Conséquences de la monoculture des conifères pour la conservation des sols et pour le bilan hydrologique

par

A. NOIRFALISE et R. VANESSE

du

CENTRE D'ECOLOGIE FORESTIERE



1975

ASSOCIATION DES ESPACES VERTS (A.S.B.L.)

Rue de la Regence, 26 A — 1000 BRUXELLES

SOMMAIRE

Présentation 5

Avant-propos 7

PREMIERE PARTIE — CONSEQUENCES DE LA MONOCULTURE DES CONIFERES POUR LA CONSERVATION DES SOLS

1. L'ACCUMULATION DE MATIERE ORGANIQUE, POINT DE DEPART DES MODIFICATIONS EDAPHIQUES 9
   - 1.1. Importance de l'accumulation 9
   - 1.2. Accumulation et retombées annuelles 10
   - 1.3. Propriétés histo-chimiques des litières de conifères 11
2. LES MODIFICATIONS DE LA BIOCENOSE DU SOL 11
   - 2.1. Incidences sur la microfaune 11
   - 2.2. Incidences sur la microflore du sol 13
   - 2.3. Conséquences pour le système d'humification 14
3. L'EFFET DES CONIFERES SUR LE BILAN CHIMIQUE DES SOLS . . 15
   - 3.1. L'immobilisation minérale dans les litières 15
   - 3.2. La balance minérale des peuplements 16
4. L'EFFET DES CONIFERES SUR LES PROPRIETES PHYSICO-CHIMIQUES DU SOL 19
   - 4.1. L'effet acidifiant des conifères 19
   - 4.2. L'effet podzolisant des conifères 20
   - 4.3. La régression structurale du sol 21
   - 4.4. Le danger de gleyization 21
5. REVERSIBILITE DES PHENOMENES 22
   - 5.1. Réversibilité des altérations de surface 22
   - 5.2. Sols stables et sols sensibles 24

DEUXIEME PARTIE — CONSEQUENCES DE LA MONOCULTURE DES CONIFERES SUR LE BILAN HYDROLOGIQUE

1. LES COMPOSANTES DU PROBLEME 25
2. L'INTERCEPTION DE LA PLUIE EN FORET 26
   - 2.1. Le seuil d'égouttage 26
   - 2.2. Intensité de l'égouttage et caractères de la pluie 27
   - 2.3. L'écoulement le long des troncs 29
   - 2.4. L'interception et ses valeurs 29
   - 2.5. Les valeurs saisonnières de l'interception 32
   - 2.6. Influence des densités de peuplement sur l'interception 33
3. LA TRANSPIRATION DES PEUPLEMENTS FORESTIERS 34
   - 3.1. Les évaluations par pesées instantanées 34
   - 3.2. Le flux transpiratoire des arbres 35
4. LES MESURES DIRECTES DU BILAN D'EAU 37
   - 4.1. Les résultats lysimétriques 38
   - 4.2. Les fluctuations du stock d'eau dans le sol 38
   - 4.3. Les bilans d'écoulement 39
5. CONCLUSIONS 40

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 42

PRESENTATION

C'est un honneur pour moi que de présenter cette étude sur l'épicéa rédigée par le Professeur Albert Noirfalise.

Ayant été mêlé de près aux activités de l'A.S.B.L. « Promotion des Espaces Verts » depuis son origine, je suis heureux de cette occasion qui m'est offerte de rendre un hommage public à l'homme qui a toujours soutenu les efforts d'une équipe dont les préoccupations sont avant tout d'élever le débat au-dessus des passions et de viser dans toute la mesure humainement possible, à une rigoureuse objectivité.

Le Professeur Albert Noirfalise est connu, apprécié, et réputé dans les milieux scientifiques internationaux : Docteur ès Sciences, Professeur d'Ecologie à la Faculté des Sciences Agronomiques de Gembloux, Directeur du Centre d'Ecologie Forestière et Rurale, Président du Conseil Supérieur de la Conservation de la Nature et de la Commission Scientifique des Hautes-Fagnes et expert près le Conseil de l'Europe et de la C.E.E. Il sait de quoi il parle mais ne parle que quand il le faut et après réflexion bien mûrie.

En maintes occasions, il a publié des articles de vulgarisation scientifique, véritables régals de clarté, de concision et d'esprit de synthèse.

Cette fois, le Professeur Noirfalise nous donne une étude fouillée sur un sujet qui passionne les spécialistes : il se penche sur l'incidence de la culture des résineux sur l'environnement — en particulier leur influence sur la qualité du sol et sa conservation. Il n'a pas abordé les aspects esthétiques qui ne sont pas, estime-t-il, de son domaine. Il n'a pas non plus abordé les incidences sur la qualité des eaux puisqu'aussi bien la Belgique est le seul pays à avoir pris des mesures dans ce domaine, en empêchant de boiser à moins de six mètres des rives de nos cours d'eau.

La remarquable synthèse que représente son ouvrage a été approuvée par l'ensemble de notre Association. Celle-ci lui est particulièrement reconnaissante d'avoir souhaité la placer sous ses auspices, pour bien marquer le genre de démarche qu'elle compte entreprendre pour répondre à l'objet de ses préoccupations et de sa dénomination : la promotion des Espaces Verts.

René PECHERE.

PREMIERE PARTIE

Conséquences de la monoculture des conifères pour la conservation des sols

1. L'ACCUMULATION DE MATIERE ORGANIQUE, POINT DE DEPART DES MODIFICATIONS EDAPHIQUES

1.1. Importance de l'accumulation

Il est bien connu que sous les conifères, les litières s'accumulent en une couche organique beaucoup plus épaisse que sous les feuillus. Les premières mesures, effectuées par OVINGTON (1954-1959) dans la forêt expérimentale d'Abbotswood (Grande-Bretagne), sont reprises au Tableau I. Elles concernent l'ensemble des horizons organiques (horizons 0), comprenant la litière non décomposée (L), la couche de litière en voie de décomposition (F) et la couche d'humus brut (H) non incorporée au sol minéral.

TABLEAU I. — Accumulation de matières organiques sous conifères et feuillus. en T/ha (OVINGTON, 1954-1959, valeurs arrondies)

	Total	Couche F + H	Couche L
Mélèze . . . . (Larix eurolepis)	25 et 26	20 et 16	5.0 et 10
Epicéa . . . . (Picea abies)	34,7	30,7	4,0
Pin noir . . . . (Pinus nigra)	21,7	19,3	2,4
Pin sylvestre . . . . (Pinus sylvestris)	12,7	11,6	1,1
Sapin géant . . . . (Abies grandis)	12,2	9,9	2,3
Sapin de Douglas . . . . . (Pseudotsuga menziesii)	8,2	5,9	2,3
Hêtre . . . . (Fagus sylvatica)	10,7	9,1	1,6
Chêne divers en mélange . . .	5,0	4,5	0,5
Châtaignier . . . . (Castanea vesca)	4,0	3,7	0,3
Chêne pédonculé . . . . . . (Q. pedunculata)	3,7	3,5	0,2

Les mesures de DELECOUR et al. (1967) effectuées en Ardenne, sur sols bruns acides, donnent des valeurs encore plus élevées : 45 à 97 T/ha sous épicéa contre 10 à 40 T/ha sous hêtraie. ULRICH et al. (1971) dans les forêts du Sölling (Weserbergland) ont trouvé 46 T/ha sous épicéa contre 19 T/ha sous hêtraie.

1.2. Accumulation et retombées annuelles

L'accumulation des litières sous conifères n'est pas due à des retombées annuelles plus importantes. Les évaluations colligées dans le tableau II indiquent que les retombées totales (feuilles ou aiguilles, brindilles, fragments d'écorces, inflorescences et semences) sont du même ordre de grandeur pour l'épicéa et le hêtre. Certes, elles varient d'une année à l'autre dans une mesure appréciable, selon les aléas climatiques (tempêtes, sécheresses, froids excessifs) ou biologiques (dégâts d'insectes ou de cryptogames). Elles peuvent aussi varier d'un peuplement à l'autre selon l'âge et la densité. On sait également que les années de forte fructification donnent lieu, chez l'épicéa, à des chutes d'aiguilles plus abondantes que de coutume.

TABLEAU II. — Retombées sous feuillus et conifères en T/ha.

	Nombre de mesures	Moyenne annuelle	Extrêmes annuels	Auteurs	
Pin sylvestre	29	2,9	1 à 6	BRAY et GORHAM	(1964)
	2	4,8	3,6 à 6	AUSSENAC	(1969)
	1	3,1	—	BAYENS	(1954)
Epicéa	26	3,4	1,6 à 6	BRAY et GORHAM	(1964)
	3	5,7	5,6 à 6	NIHLGARD	(1972)
	2	2,3 et 2,7	—	DUVIGNEAUD et al.	(1972)
	1	3 à 3,5	—	DIETRICH	(1963)
	1	2,9	—	BAYENS	(1954)
	1	2,0	—	AUSSENAC	(1969)
Hêtre	15	4,3	3,3 à 6,3	MANIL et al.	(1963)
	29	3,3	1,7 à 6,3	BRAY et GORHAM	(1964)
	3	5,7	5,2 à 6,3	NIHLGARD	(1972)
	3	4,0	3 à 4,5	TOUTAIN-DUCHAUFOUR	(1970)
	2	2,9 et 3,1	—	DUVIGNEAUD et al.	(1972)
	1	3,3	—	BAYENS	(1954)
Chêne pédonculé	6	3,9	3,3 à 4,4	BRAY et GORHAM	(1964)

Si l'on compare les Tableaux I et II, il apparaît que la matière organique accumulée sur le sol représente 7 à 10 fois les retombées annuelles sous épicéa, 2 à 3 fois sous le hêtre et 1 fois sous le chêne pédonculé. Les sapins à aiguilles tendres (Abies, Pseudotsuga) occupent une position intermédiaire entre les conifères à feuilles dures (épicéa, pin) et la hêtraie. Il y a donc manifestement un retard à l'humification sous les résineux et ce retard est dû aux propriétés histo-chimiques de leur litière.

1.3. Propriétés histo-chimiques des litières de conifères

Les aiguilles de conifères sont moins riches en protéines que les feuilles de nos essences indigènes, ce qui leur vaut de résister davantage à l'attaque des agents de la décomposition. Leur rapport C/N est très élevé : 65 pour les aiguilles de pin contre 40 à 45 pour les feuilles de hêtre et de chêne (WITTICH, 1959). Les tissus superficiels sont plus durs et les teneurs en lignine plus élevées, ce qui implique une attaque préalable par les champignons, avant que les protéines ne soient accessibles. Le rapport C/N demeure d'ailleurs plus élevé dans l'humus holorganique et même dans l'humus incorporé au sol minéral (horizon Ah). EVERS (1969) cite à cet égard les valeurs suivantes :

	Feuillus (chêne, hêtre)	Epicéa
Teneur en matière organique dans l'horizon Ah (4 cm)	6,2 - 9,1 - 13,1	10 - 19,5 - 54,1
Rapport C/N de l'humus	15,2 - 17,9 - 21,7	18,4 - 25 - 29,3

On sait aussi que les litières de conifères libèrent en se décomposant des dérivés phénoliques, tels le phloroglucinol, l'acide chlorogénique, l'acide gallique, la coumarine, qui sont des inhibiteurs bactériens (DOMMERGUES et MANGENOT (1970). BAUZON et al. (1969) et MOREAU (1959) à propos du sapin, BUBLITZ (1959) et BECK et al. (1969) à propos de l'épicéa ont montré que les extraits aqueux des aiguilles vertes inhibent le développement des colonies de *Bacillus megaterium* in vitro. C'est également à ces produits qu'on attribue certains effets toxiques des conifères sur la biocénose des eaux superficielles et des poissons.

WITTICH (1959) en comparant les rapports C/N et l'accumulation des litières classe comme suit les diverses essences par ordre croissant de résistance à la décomposition : frêne, érable, chêne, bouleau, hêtre, sapin, épicéa, pin sylvestre et mélèze.

L'accumulation des litières et la forte interception du rayonnement solaire sous conifères modifient aussi le microclimat du sol. NIHLGARD (1970) constate que sous pessière, la température du sol est de 2 à 3° C inférieure à celle qu'on relève sous hêtraie, jusque fin mai. En outre, l'humidité dans la couche superficielle du sol est de 10 % inférieure sous pessière pendant tout l'été. Ces diverses circonstances affectent la biocénose du sol dans sa composition et ses activités.

2. LES MODIFICATIONS DE LA BIOCENOSE DU SOL

2.1. Incidences sur la microfaune

Bien que les inventaires faunistiques comparatifs soient encore peu nombreux, ils soulignent que certains groupes fréquents sous feuillus régressent

notablement sous conifères, par exemple les tardigrades, les isopodes, les diplopodes, les myriapodes, les gastéropodes (NEF, 1957 ; GALOUX, 1953 ; RONDE, 1957 ; PSCHORN-WALKER, 1958 ; RABELER, 1962 ; GASPAR, 1973). Par contre, les acariens et les collemboles se multiplient dans l'humus de conifères et y sont plus nombreux que dans l'humus de chênaie (GALOUX, 1953 ; GASPAR, 1973).

La sensibilité de la microfaune à la nature des litières est bien illustrée par les observations de GALOUX (1953), PSCHORN-WALKER (1958), RABELER (1962) et RADU et al. (1962) qui constatent que les groupes commensaux des feuillus se maintiennent et se reconstituent dans les îlots mêmes ponctuels où ces dernières essences sont maintenues ou réintroduites.

Les modifications les mieux connues concernent les lombrics du sol. Ceux-ci sont toujours beaucoup moins nombreux sous conifères que sous feuillus occupant des sols similaires (FRANZ, 1950 ; WITTICH, 1953 ; RONDE, 1954, 1957 ; BORNEBUSCH, 1953 ; GALOUX, 1953 ; BÖSENER, 1965 ; GASPAR, 1973). Les inventaires de RONDE dans quelques forêts bavaroises sont démonstratifs à cet égard (Tableau III).

TABLEAU III. — Poids moyen des lombrics en gr par m² de sol (entre parenthèses : nombre d'échantillons étudiés).

	A		B	
Epicéa	0,00	(6)	0,013	(12)
Pin sylvestre	0,011	(21)	0,0132	(12)
Mélèze	0,007	(2)	0,51	(5)
Sapin de Douglas	0,007	(1)	—	
Sapin commun	1,31	(3)	—	
Hêtraie-sapinière	0,62	(4)	—	
Hêtraie	1,06	(15)	1,70	(24)
Chênaie	—		3,42	(14)
Erablière	—		3,14	(4)
Tillaie	—		8,66	(12)
Chênaie à charme	—		7,00	(2)

A. Forstenried, München

B. Forêts de Schrobenhausen et Donaumoos, Oberarnbach.

Sous épicéa et sous pin, la biomasse des lombrics est 100 fois plus faible que sous les forêts de feuillus. L'influence du sapin de Douglas et du mélèze est moins prononcée, tandis que le sapin commun, essence indigène dans la région, ne provoque aucune régression significative.

Cette régression procède sans doute du changement des litières, mais d'autres facteurs interviennent en même temps. La pauvreté et l'acidité de beaucoup de sols réservés à l'enrésinement sont des facteurs limitants pour les

lombrics (SCHLENKER et DENNO, 1971), de même que l'excès d'humidité ou de sécheresse (WITTICH, 1963). La forte interception du rayonnement par les conifères, en maintenant le sol plus froid, agit dans le même sens.

On attribue aux lombrics un rôle important dans la qualité structurale des sols. Non seulement ils affouillent la terre mais ils stimulent aussi les activités bactériennes par leurs excréments, améliorent le rapport C/N de l'humus et contribuent à disséminer les spores de bactéries et de champignons dans le profil du sol. L'humus du type mull est lié à leur activité.

Parallèlement à la régression des lombrics, consommateurs de feuilles, on constate une multiplication des Enchytraeides, qui sont des vers de terre très petits (5 à 20 mm) d'un groupe voisin des Lombricides (BENECKE et BABEL, 1969). Ces organismes se tiennent en surface, dans l'horizon humifère et se nourrissent d'humus. Ils n'affouillent que cette couche et y creusent des pertuis beaucoup plus minces que ceux des lombrics. Ils supportent également mieux la sécheresse engendrée dans cet horizon par l'épicéa.

Les nématodes qui interviennent aussi dans la décomposition des litières sont peu sensibles aux conifères et leur population sous pessière peut s'élever à plusieurs millions d'individus par m^2 (NEF, 1957). Leur distribution verticale est moins différenciée sous conifères que sous feuillus ; dans ce dernier cas, ils se concentrent dans la litière et dans la partie inférieure de l'horizon humifère (BASSUS, 1962).

Comme la microfaune, les lombrics se maintiennent ou réapparaissent lorsqu'il y a mélange de feuillus aux conifères (RONDE, 1954), ou si l'on stimule l'humification, par exemple par un chaulage ou des engrais (BÖSENER, 1965 ; MANIL, 1973).

2.2. Incidences sur la microflore du sol

La flore mycélienne est fortement stimulée sous les conifères (FEHER, 1933 ; HARTMANN, 1952 ; AMBROZ, 1954 ; BARNAT, 1954 ; MEYER, 1960 ; SIZOVA et SUPRUN, 1962). RUDNOV et ZLANNIKOVA (1960) indiquent qu'elle est en moyenne 6 fois plus abondante sous épicéa et pin que sous feuillus.

On dénombre tout spécialement des fungi imperfecti *(Aspergillus, Penicillium, Fusarium)* qui sont spécialisés dans l'attaque des glucides, des lipides, de la cellulose et des tannins, ainsi que des basidiomycètes qui décomposent la lignine. Par contre, les actinomycètes, qui participent aux derniers stades de la décomposition de la matière organique, sont moins abondants sous conifères que sous feuillus (NIKOLA, 1954, 1956 ; WARTERESIEWICZ, 1954).

La flore bactérienne du sol subit, sous conifères, une forte inhibition en nombre et en activité ; alors que sous feuillus, on peut dénombrer 160 millions de germes par gr de terre dans l'horizon Ah de la hêtraie, on n'en trouve

plus que 1,3 million par gr dans la pessière, soit une réduction de plus de 99 % (SONN, 1960). Sous feuillus, la population bactérienne se distribue dans tout l'horizon humifère ; sous conifères elle se concentre en surface et autour des radicelles (RUDNOV et ZLANNIKOVA, 1960). EGOROVA et RAGUOTIS (1968) constatent aussi qu'elle est moins nombreuse autour des radicelles d'épicéa qu'autour des radicelles de bouleau.

Les bactéries qui interviennent dans le cycle de l'azote paraissent particulièrement sensibles. Le groupe des *Azotobacter*, bactéries libres fixant l'azote atmosphérique, est spécialement inhibé (KRASILJNIKOV et al., 1958 ; RUBENCHIK, 1960 ; BAUZON et al. 1969). Les Azotobacter sont remplacés par des *Clostridium* (BAYENS, 1954), plus tolérants à l'égard du pH, mais de rendement beaucoup plus faible (DOMMERGUES et MANGENOT, 1970).

Les bactéries de l'ammonisation et de la nitrification sont également défavorisées sinon totalement inhibées (SIMONART et HUYGH, 1953 ; AMBROZ, 1954, 1955 ; WARTESIEWICZ, 1954 ; BROUWERS, 1957 ; VEREGINA, 1958 ; MEYER, 1960 ; KASTNER et FIEDLER, 1970 ; NIHLGARD, 1971 ; BAUZON et al., 1969).

La régression des populations bactériennes sous conifères résulte de plusieurs causes cumulatives : la pauvreté des litières en protéines ; la réduction de la microfaune génératrice de débris et déjections favorables aux microbes ; l'action antibactérienne des mycéliums ; l'acidification par les pluviolessivats et la présence dans ces derniers des inhibiteurs phénoliques précédemment signalés.

Il est démontré que diverses mesures culturales peuvent réactiver la flore bactérienne du sol et les processus de nitrification. C'est le cas du chaulage, comme l'ont montré SIMONART et HUYGHE (1953) pour la pinède, BUBLITZ (1959) et MANIL (1973) pour la pessière et GALOUX pour les hêtraies à humus brut de la Forêt de Soignes. L'apport d'éléments fertilisants (urée, engrais NPK) agit dans le même sens, tout comme aussi l'éclaircie des peuplements, l'introduction de feuillus ou le travail du sol (KOVALEV et EVSEEVA, 1964).

2.3. Conséquences pour le système d'humification

La transformation de la biocénose endogée se solde par une déviation notable du système d'humification par rapport à celui qui prévaut sous feuillus. Le produit final est un humus noirâtre, pulvérulent à l'état sec et d'origine essentiellement mycogène (humus brut ou mor). Il est fréquemment cité comme caractéristique des pinèdes et des pessières artificielles (GENSSLER, 1959 ; VAJCIS, 1958 ; BONNEVIE-SVENDSEN et GJEMS, 1957 ; SCHLENKER et al., 1969 ; BONNEAU, 1973 ; etc.). Les résineux à feuilles tendres occupent à cet égard une position intermédiaire entre les pinèdes et pessières d'une part, les feuillus d'autre part (PAVARI et al., 1953).

Certes, la formation de mor n'est pas absolument générale. Dans les plantations créées sur des sols forestiers à mull acide et sur d'anciennes terres de prairie ou de culture, le type d'humus peut rester celui du moder ou même du mull acide, spécialement lorsque les peuplements sont éclaircis par l'âge ou des coupes progressives. Inversément on peut trouver, en Ardenne notamment, des hêtraies à humus brut (dysmoder ou mor). En somme, les monocultures de conifères imposent un type d'humification qui est celui des forêts spontanées qu'ils constituent dans leur zone écologique naturelle.

Ajoutons enfin qu'une des propriétés importantes de l'humus brut (ou humus mycogène) des conifères est de produire des acides fulviques lessivables par les pluies. Dans les horizons minéraux, ces acides contribuent à la dissociation des argiles, en libérant le fer et l'alumine. C'est le processus de podzolisation sur lequel on reviendra plus loin.

3. L'EFFET DES CONIFERES SUR LE BILAN CHIMIQUE DES SOLS

3.1. L'immobilisation minérale dans les litières

Les aiguilles et litières de conifères ont des teneurs moins élevées en éléments fertilisants que celles des feuillus. ULRICH et al. (1972) indiquent des écarts de 20 à 80 % en faveur du hêtre par rapport à l'épicéa pour l'azote, le phosphore, le potassium, le magnésium et le manganèse. Ces différences se marquent encore (35 à 50 %) pour des peuplements fertilisés de la même manière (WITTICH, 1961).

Comme le poids des retombées annuelles diffère peu chez l'épicéa et le hêtre, il en résulte des restitutions chimiques au sol qui sont sensiblement inférieures pour les résineux par rapport aux feuillus. AUSSENAC et al. (1969) donnent à cet égard des valeurs comparatives en stations adjacentes (même sol) (Tableau IV).

TABLEAU IV. — Retombées chimiques annuelles sur le sol, en Kg/ha.

	N	P	K	Ca	Mg	Mn	Fe
Pin sylvestre	8,4	0,8	2,1	6,9	0,1	0.6	0,6
Epicéa	8,6	0,6	2,4	11,0	0,7	1,8	0,4
Hêtre avec charme	13,9	1,4	5,6	14,3	1,0	2,2	0,4

D'autre part, l'accumulation des litières sous la pessière immobilise un stock minéral important et le soustrait temporairement au cycle nutritif de la forêt. Les chiffres publiés par OVINGTON (1954 - 1959) sont éloquents à cet égard (Tableau V).

TABLEAU V. — Quantités d'éléments nutritifs stockés dans les horizons holorganiques, sous divers peuplements, en Kg/ha.

	N	P	K	Ca	Mg	Na	Cendres totales
Mélèze	594	25	23	104	27	3	342,1
Epicéa	436	24	21	117	19	5	315,6
Epicéa	360	19	30	65	27	4	684,5
Pin noir	274	15	24	67	15	3	196,6
Pin sylvestre	192	9	11	25	9	2	150,3
Sapin géant	186	14	27	60	16	3	380,8
Sapin de Douglas	119	7	9	17	7	1	132,9
Hêtre	180	11	20	51	14	1	262,3
Chêne	96	7	11	40	6	1	88,7
Châtaignier	80	6	10	32	7	1	73,7
Chêne pédonculé	71	5	8	35	5	1	57,3

Si l'on compare l'épicéa au hêtre, le stock immobilisé est 2 à 3 fois supérieur pour l'azote, 2 fois pour le phosphore, le magnésium et le calcium et 5 fois pour le sodium. Les écarts sont encore plus prononcés à l'égard des autres feuillus. Bien que les résineux aient des exigences minérales plus faibles que les feuillus, les risques de carence ne sont pas exclus, notamment dans les jeunes pessières pour ce qui concerne l'azote, le phosphore ou le magnésium. L'idée d'y pallier à titre préventif en mobilisant les litières et l'humus brut par des traitements appropriés (chaulage, application d'urée, travail du sol) découle de ces constatations. Ces procédés se soldent de visu par un développement de la flore herbacée (y compris des indicateurs nitrophiles) et selon toute vraisemblance par un relèvement temporaire des accroissements ligneux.

3.2. **La balance minérale des peuplements**

L'immobilisation chimique dans les litières n'est qu'un aspect du bilan minéral des peuplements. Une approche dynamique du problème permet de beaucoup mieux saisir la circulation des éléments (« turn over ») et leur dévolution dans l'écosystème forestier.

Des travaux récents ont fourni à ce sujet des données intéressantes. Les premières proviennent d'une étude suédoise (NIHLGARD, 1972, Tableau VI).

TABLEAU VI. — Distribution des éléments nutritifs dans une hêtraie (78 ans, 20,4 m) et une pessière (55 ans, 24,6 m) (sol brun acide sur Cambrien) (NIHLGARD, 1972).

		HETRAIE				PESSIERE			
		Peuplement et strate herbacée	Racines	Total	Litière	Peuplement et strate herbacée	Racines	Total	Litière
Biomasse	T/ha	324	51	375	5,2	303	59	362	18,5
Carbone	T/ha	159	26	185	2,7	153	29	182	9,1
Azote	Kg/ha	1060	150	1210	86	770	90	860	245
Calcium	»	603	42	645	34,2	459	45	504	47,9
Potassium	»	460	79	539	10,4	437	65	502	15
Phosphore	»	84,5	15,6	100,1	15,8	87	5,7	92,7	15,4
Magnésium	»	104,8	13,5	118,3	4,8	69,2	10,5	79,7	7,5
Manganèse	»	112,2	14,6	126,8	9,1	142,9	15	157,9	10,7
Soufre	»	68,2	14,5	82,7	7,7	112,2	14,5	126,7	25,1
Sodium	»	32,2	6,5	38,7	1,2	37,5	3,7	41,2	4,1

Pour des biomasses à peu près équivalentes, les rétentions minérales totales (peuplement + litière) sont toujours plus élevées en hêtraie qu'en pessière, ce qui correspond bien à la réputation de frugalité chimique des conifères : + 6 % pour le potassium et le phosphore, + 20 % pour l'azote et le calcium, + 40 % pour le magnésium ; mais l'inverse prévaut pour le soufre (— 40 %), le manganèse (— 20 %) et le sodium (— 8 %). Les pourcentages stockés dans les litières sont par contre plus élevés sous épicéa que sous feuillus, l'écart étant le plus sensible pour l'azote et le magnésium ; mais l'inverse prévaut pour le potassium et le sodium.

Pour les mêmes peuplements, NIHLGARD établit comme suit l'absorption annuelle totale, la rétention dans le peuplement et les restitutions par les litières. (Tableau VII).

TABLEAU VII. — Bilan chimique annuel des peuplements en Kg/ha. (NIHLGARD, 1972)

	Absorption annuelle (A + B)		Restitution par les litières (A)		Rétention dans le peuplement (B)	
	Hêtre	Epicéa	Hêtre	Epicéa	Hêtre	Epicéa
Azote	152	72	69	58	83	14
Calcium	56,5	31,8	31,7	19,8	24,8	12
Potassium . . .	31	19,2	14,4	10,7	16,6	8,5
Phosphore . . .	8,5	6,4	5,0	4,8	3,5	1,6
Magnésium . . .	7,7	5,0	4,3	3,1	3,4	1,9
Manganèse . . .	12	10,3	7,8	7,0	4,2	3,3
Soufre	8,9	8,3	6,4	5,4	2,5	2,9
Sodium	2,2	3,0	2,2	2,0	1,1	1,03

Les chiffres d'absorption par la hêtraie sont nettement plus élevés, les chiffres de rétention sont quasi doublés pour les éléments majeurs et quadruplés pour l'azote, bien que l'accroissement moyen annuel de la biomasse ait été de 32 % inférieur à celui de la pessière.

DENAYER et DUVIGNEAUD (1972) donnent également l'absorption et la restitution par les litières pour une hêtraie ardennaise de 130 ans (surface terrière de 28,9 m²/ha ; productivité de 6,2 T/ha - année) et une pessière de 55 ans (surface terrière de 41,5 m²/ha ; productivité ligneuse de 10,5 T/ha-année).

TABLEAU VIII. — Bilan minéral annuel de deux peuplements de hêtres et d'épicéas en Ardenne (DENAYER et DUVIGNEAUD, 1972), en Kg/ha.

	Absorption annuelle		Restitution par les litières totales		Rétention dans le peuplement (bois)	
	Hêtre	Epicéa	Hêtre	Epicéa	Hêtre	Epicéa
Azote	72,9	52,6	50,1	22,2	22,8	30,4
Phosphore . . .	5,4	4,7	3,6	1,7	1,8	3,0
Potassium . . .	28,0	21,6	20,0	4,2	8,0	17,4
Calcium	35,4	32,9	24,1	18,8	11,3	14,1
Magnésium . . .	3,4	2,1	4,7	5,1	1,3	3,0
Soufre	8,7	13,0	5,3	5,6	3,4	7,4

Dans ce dernier cas, les rétentions de la pessière sont plus élevées que celles de la hêtraie, contrairement à l'observation de NIHLGARD (1972). Ce fait s'explique probablement par la disparité d'âge des deux peuplements.

De ces recherches, on doit conclure qu'à productivité égale, les résineux absorbent et exportent moins d'éléments minéraux du sol que les feuillus, ce qui confirme l'opinion des anciens auteurs à ce sujet. Toutefois, l'épicéa produisant nettement plus de bois exportable que le hêtre, il risque d'appauvrir davantage le sol à long terme, ce qui justifierait le recours à la fertilisation chimique dans les monocultures successives de conifères. Le même fait pourrait expliquer que la productivité puisse diminuer en seconde ou troisième génération d'épicéa, sur les sols déjà pauvres au départ.

Les analyses du sol minéral effectuées par NIHLGARD (1972) dans la pessière qu'il a étudiée, sur un sol cambrien pauvre, soulignent du reste que les quantités minérales accumulées dans le peuplement sur pied sont dix fois plus élevées que la réserve échangeable du sol pour le manganèse, 7 à 8 fois pour la potasse, 6 fois pour le soufre, 3 fois pour le calcium, 2 à 3 fois pour le magnésium et 1 à 1,5 fois pour le phosphore et le sodium. On doit donc s'attendre à une désaturation plus prononcée du sol sous les monocultures de conifères. MIHAI (1971) constate effectivement sous épicéa, dans les 60 premiers cm du sol, une diminution de 12,7 % de la saturation chimique par rapport à la hêtraie. GENSSLER (1959) évalue le déficit d'azote dans le sol à 25 - 30 % dans les horizons minéraux.

La culture intensive de conifères pourrait donc déboucher à moyen ou long terme sur des carences nutritives, spécialement dans les peuplements où l'on vise la production de masse et la récolte de bois jeune (bois de papeterie).

4. L'EFFET DES CONIFERES SUR LES PROPRIETES PHYSICO-CHIMIQUES DU SOL

4.1. L'effet acidifiant des conifères

Le phénomène d'acidification sous les conifères est confirmé par tous les chercheurs (MARAN, 1959 ; SONN, 1960 ; HARTMANN, 1960 ; MEYER, 1960 ; GENSSLER, 1959 ; DUCHAUFOUR et BONNEAU, 1961 ; ULRICH et al., 1971 ; EVERS, 1969). Le tableau IX donne des exemples significatifs à cet égard pour des stations contiguës.

TABLEAUX IX. — Modification du pH (H_2O) sous conifères par rapport à des feuillus sur stations identiques

Type de sol	Feuillus	Conifères	Auteur
Sol brun acide	3,8 (hêtre, chêne)	3,2 (Abies alba)	BAUZON et al. 1969
Sol lessivé à pseudogley	3,9 (hêtre, chêne)	3,3 (Pin sylvestre)	id.
Sol lessivé podzolique	5,0 (hêtre, chêne)	4,4 (Epicéa)	id.
Sol brun lessivé	5,3 (hêtre, chêne)	4,5 (Epicéa)	id.
Sol brun lessivé	4,3 (hêtre, chêne)	3,9 (Epicéa)	EVERS, 1969
Sol brun lessivé à pseudogley	4,2 - 4,7 (hêtre, chêne)	3,9 - 4,1 (Epicéa)	id.
Sol grisâtre à pseudogley	4,3 (hêtre)	3,6 (Epicéa)	id.
Pélosol sur Keuper	4,9 (chêne)	4,4 (Epicéa)	id.

Le pH (KCl), qui exprime l'acidité d'échange, est moins affecté que le pH (H_2O), ainsi qu'il ressort des observations de GENSSLER (1959), MANIL et al. (1963) et EVERS (1969).

L'abaissement du pH (H_2O) ne s'accentue que très peu sous les peuplements de seconde génération, observés par EVERS (1969) dans le Württemberg, mais on peut présumer qu'il est susceptible de se propager en profondeur avec le temps.

L'acidification est attribuée par d'aucuns à la désaturation des horizons minéraux (GENSSLER, 1959 ; DUCHAUFOUR et BONNEAU, 1961), mais il semble bien que les pluviolessivats des peuplements jouent un rôle important et qu'ils induisent au surplus des fluctuations saisonnières ; NAUMOV et ANTONOV (1970) constatent que l'acidité du sol augmente sous épicéa d'avril à mi-mai, puis diminue de la mi-juillet à la mi-octobre ; BRUCKERT et al. (1971) ont comparé l'acidité des pluies sous pin sylvestre et hêtre (Tableau X).

TABLEAU X. — Valeurs du pH des pluviolessivats

	Sous pin sylvestre	Sous hêtre
Février	3,5	—
Mai	3,9	6,3
Juin	5,2	6,2
Septembre	4,5	6,1
Novembre	—	5,0

La pluie entraîne aussi des substances acidoïdes produites dans l'humus brut (acides fulviques, acide citrique). Aussi est-ce dans les horizons influencés par l'humus (horizons Ah) que l'acidification se manifeste en premier lieu et de manière prépondérante.

L'acidification du sol est fort bien supportée par nos conifères, mais elle peut engendrer des effets secondaires. En-dessous du pH 4, le phosphore forme avec le fer libre des complexes insolubles. Le taux d'alumine libre augmente également ; ses propriétés toxiques à l'égard des essences et espèces neutrophiles sont connues, mais on ignore quelle est leur portée pour les conifères eux-mêmes.

4.2. **L'effet podzolisant des conifères**

L'humus brut et les acides fulviques prédisposent à la podzolisation du sol, qui se traduit dans les sables pauvres, par une décoloration de l'horizon A_2 et un transfert des oxydes de fer dans l'horizon B.

BONNEAU (1973) a observé des podzols sous de vieux pins, en Sologne et dans les Landes. L'effet podzolisant a été aussi signalé par MARAN (1959) en Tchécoslovaquie, par KRAUS (1939), en Allemagne, BRUCKERT et al. (1971) en Lorraine, par HARTMANN (1952) en Autriche.

Les chercheurs russes font état d'observations analogues dans la zone des forêts mixtes de feuillus et de conifères (VEREGINA, 1958 ; VAJCIS, 1958 ; SMIRNOVA et GROMASEVA, 1955 ; SKRYNNIKOVA, 1958).

L'existence d'un podzol sous conifères peut évidemment être antérieure au boisement lui-même. C'est le cas dans les anciens podzols humo-ferriques formés sous la lande à bruyère. Dans pareil cas, il serait erroné d'attribuer la podzolisation aux conifères, comme d'aucuns ont cru pouvoir le supposer. Dans les sols mieux fournis en éléments fins, tels les sols bruns acides, la podzolisation se traduit tout au plus par la formation d'un micropodzol de surface (A_2 décoloré de 2 à 5 cm). BONNEAU (1973) cite des cas de ce genre, qui sont également connus dans nos Ardennes. On peut aussi valablement supposer que le sol brun acide enrésiné évolue à long terme vers un sol brun ocreux, qui se différencie du précédent par un taux plus élevé de fer mobile. Encore une fois, de telles modifications peuvent être imputables à d'autres causes, car on les observe aussi sous des hêtraies originellement très pauvres

(hêtraies à myrtille) ou ruinées par le soutrage des litières ou l'essartage périodique (NOIRFALISE, 1956). HAUSSER (1964) et von ZEZSCHWITZ (1969) évoquent aussi de telles éventualités.

Ce serait d'ailleurs une erreur de croire que l'apparition d'indices de podzolisation dans un sol implique nécessairement une perte importante de fertilité (BONNEAU, 1973) et l'on doit peut-être accueillir avec modération une opinion telle que celle de MARAN (1959) qui considère qu'en Tchécoslovaquie la monoculture des conifères a altéré 400.000 ha de sols forestiers, dont 80 à 100.000 ha sont à ce point dégradés que leur restauration n'est plus possible par de simples mesures culturales, telles la réintroduction des feuillus. Pareil diagnostic ne peut certainement être appliqué aux sols limono-caillouteux de l'Ardenne (MANIL et al., 1963) ou du Harz (GENSSLER, 1959). Ce dernier n'a relevé, dans ces sols, aucun stigmate de podzolisation, même après un siècle et demi de monoculture d'épicéa, pas plus qu'une chute de productivité des peuplements, même à la 3me génération. Par contre, d'une génération à l'autre, des régressions de croissance ont été mentionnées sur sols sablonneux podzolisés. Elles s'expliquent par l'épuisement chimique du sol.

4.3. La régression structurale du sol

Il existe incontestablement des signes de régression structurale dans la plupart des sols enrésinés, mais ces régressions concernent surtout les horizons superficiels, dont la teneur en humus est plus faible que sous feuillus (WERNER, 1964 ; SCHLENKER et al. 1969 ; VINOKUROV et al. 1967). On constate souvent que sous les pessières ardennaises l'horizon humifère Ah est réduit à 2-3 cm, au lieu de 10 cm sous hêtraie et que l'épaisseur totale du sol influencé par l'humus (solum biodynamique) passe de 50 cm sous hêtraie à 20-25 cm sous pessière. De ce fait, la structure des horizons superficiels devient particulaire et plus labile, ce que BENECKE et BABEL (1969) ont confirmé par des mesures physiques. Ils constatent une légère diminution de la macrostructure (ou porosité d'aération) dans les 30 premiers cm et une augmentation corrélative de la microstructure. Ils attribuent cette évolution au remplacement des lombrics par les Entrachaeïdés. Ils ont également observé, dans ce même horizon, une structure feuilletée en plaquettes, due à la compression exercée sur le sol par le plateau radiculaire des épicéas balancés par le vent.

Au total, la régression structurale est peu marquée et certainement réversible grâce aux mesures culturales.

4.4. Le danger de gleyization

Dans les sols limoneux lessivés à pseudogley (horizon B glossique ou hydromorphe), tels qu'il en existe localement en Ardenne et plus fréquemment sur le plateau condruzien ou brabançon, la monoculture des conifères paraît susceptible d'aggraver la gleyization du sol. La plupart des informations touchant cette question proviennent de la Suisse et du Sud de l'Allemagne.

BLUME et DIETERICH (1969) considèrent que la culture de l'épicéa peut accentuer la marmorisation du pseudogley pendant la période du blanc-étoc, qui favorise la remontée de la nappe aquifère. Alors que l'effet de l'épicéa est faible à très faible sur les sols bruns et bruns lessivés, il peut donc être sensible dans les sols à pseudogley. C'est aussi l'opinion de divers auteurs suisses, français ou allemands, dont SCHLENKER et al. (1969) et BONNEAU (1973). Le phénomène s'explique par le fait que les racines de l'épicéa ne pénètrent pas dans l'horizon de pseudogley et que les espèces ligneuses ou herbacées, qui seraient aptes à le coloniser, sont éliminées par l'excès d'ombrage sous la pessière. Dès lors, le pseudogley a tendance à se compacter et à devenir moins perméable ou plus marmorisé qu'il ne l'était auparavant. Il prend aussi une teinte plus claire et plus grisâtre, par diminution du taux d'humus. (BENECKE et BABEL. 1969).

Cette évolution défavorable pourrait se solder à long terme par un relèvement du niveau hivernal d'engorgement du sol. C'est le mécanisme invoqué pour expliquer l'apparition de la molinie et même des sphaignes dans des blancs étocs et des clairières, après deux ou trois générations d'épicéa sur sols à pseudogley.

Encore une fois, il serait erroné d'attribuer l'origine même des pseudogleys et des stagnogleys à la monoculture persistante des conifères. Ces horizons hydromorphes sont beaucoup plus anciens, par exemple dans les loess lehmifiés de la Belgique et du nord de la France (JAMAGNE, 1972), de la Lorraine et de la Haute Souabe (WERNER, 1964). Mais il est certain que ces sols font partie, au même titre que les sols sablonneux, de la catégorie des substrats sensibles à la monoculture des résineux. Dans les premiers, il y a accentuation de stigmates de gleization et de marmorisation et, dans les seconds, des stigmates de podzolisation (NOIRFALISE, 1964 ; BONNEAU, 1973 ; SCHLENKER et al. 1969). Sur ces deux catégories de substrats, des erreurs sylvicoles peuvent avoir plus de conséquences que dans les sols résistants, tels les sols saturés en bases ou les sols bruns acides. D'autres auteurs sont cependant plus optimistes et considèrent que les effets observés sont davantage liés au type de station qu'à l'effet de l'essence elle-même (KUNDLER, 1963).

5. REVERSIBILITE DES PHENOMENES

Dans quelle mesure les modifications qu'on vient d'analyser sont-elles réversibles et de quelle manière la sylviculture des conifères peut-elle les corriger ? Telles sont les questions qu'il reste à se poser.

5.1. Réversibilité des altérations de surface

L'accumulation des litières et la formation d'humus brut sous conifères avec leurs conséquences nutritionnelles, biologiques et pédologiques, sont

liées aux propriétés histochimiques des aiguilles. Elles sont inévitables, mais elles sont réversibles. Dans des peuplements de *Picea sitchensis, Pseudotsuga menziesii* et *Larix eurolepis*, PAGE (1968) constate que le maximum d'accumulation se situe avant la première éclaircie (arbres de 8 à 9 m). Ensuite, la décomposition s'améliore d'une élaircie à l'autre et la remise en circulation d'éléments minéraux se traduit par un relèvement du pH et le retour d'une strate herbacée. Dans les vieux peuplements (30 à 36 m), les conditions d'humus et de flore sont à peu près restaurées dans l'état où elle se trouvent sous feuillus, en stations similaires. La même réversibilité s'observe dans les pessières ardennaises et la flore qui se reconstitue dans les vieux peuplements permet même de diagnostiquer le type de hêtraie préexistante (NOIRFALISE et THILL, 1975). On constate aussi que des espèces nitratophiles réapparaissent dans les trouées et dans les coupes. Selon toute apparence, le sol récupère son équilibre initial, mais il serait exagéré d'attendre une amélioration. Dans les terrains très peu fertiles par nature, c'est la canche flexueuse et la myrtille qui se réinstallent dans les sols bruns acides, la bruyère dans les sables podzolisés, la molinie et son cortège dans les sols humides ou paratourbeux.

La reconstitution d'une flore forestière spontanée, d'ailleurs accompagnée de brins ligneux (sorbier, bouleau, tremble, saule, selon les sites) n'est pas le seul signe de réversibilité des altérations. La productivité des conifères elle-même ne semble pas diminuer dans les sols bruns acides de l'Ardenne ou du Harz au terme de la seconde génération d'épicéa, mais le diagnostic est certainement moins favorable pour des sols sablonneux très pauvres, comme ceux des anciennes landes à bruyère du bas pays.

Il n'en demeure pas moins que des difficultés peuvent survenir lors des replantations de conifères dans des sites où la matière organique accumulée n'est pas encore entrée dans un stade d'humification active. C'est le cas lors de reboisements immédiats sur coupes à blanc de peuplements insuffisamment éclaircis ou trop jeunes : il est alors opportun d'envisager un apport nutritif au pied du plant, ou de stimuler l'humification par un chaulage ou un épandage d'engrais peu de temps avant la coupe. En effet, tout retard dans le démarrage d'une nouvelle plantation se répercute, au terme d'exploitation, par un déficit final de production. Ainsi un retard de 3 ans sur une révolution de 60 ans correspond à une chute de production de 5 %. Il n'est pas exclu que les diminutions de production en 2° ou 3° génération que l'on pourrait détecter sur les sols bruns acides ne trouvent leur cause dans cette circonstance.

Au cours de leur vie, les peuplements passent par une phase critique avant les premières éclaircies ; c'est le moment auquel l'immobilisation chimique dans les litières est maximum. A moins qu'on ne soit disposé à corriger ces carences temporaires par des applications coûteuses d'engrais, on aura intérêt à éclaircir le peuplement aussitôt que possible et dès le moment où des élites commencent à se manifester. Ultérieurement, la sylviculture sera conduite de façon à ne pas conserver un état abusivement serré : ce sera à la fois bénéfique pour la nutrition du peuplement et pour la production de gros bois commerciables au meilleur prix.

5.2. **Sols stables et sols sensibles**

Le problème des altérations profondes et irréversibles est, à notre avis, plus important pour l'avenir.

A cet égard, il faut distinguer, comme le font SCHLENKER et al. (1969), entre sols « stabiles » et sols « labiles ». Les premiers résistent bien à la culture intensive de conifères ; ce sont les sols bruns acides (sols ardennais) et à fortiori, les sols bruns mésotrophes ou eutrophes. Les seconds sont nettement plus sensibles. C'est le cas des sols sablonneux pauvres qui peuvent être podzolisés après une ou deux générations de conifères ou subir un épuisement chimique de leur faible réserve nutritive. C'est aussi le cas des sols limoneux à pseudogley, dont l'horizon B peut se marmoriser et devenir imperméable, ce qui réduit d'autant la profondeur utile du sol et prédispose à l'envahissement ultérieur par la molinie et parfois par les sphaignes. Les projets d'enrésinement doivent donc tenir compte des types de sols et de stations, et la chose est d'autant plus facile qu'il existe en Belgique des cartes pédologiques et sylvopédologiques très élaborées et détaillées.

Il reste enfin que les conifères sont d'autant moins agressifs à l'égard du sol que leurs aiguilles sont plus tendres, ce qui est le cas du groupe des sapins (Abies, Pseudotsuga) ; leurs litières se décomposent mieux et leur alimentation chimique est meilleure de ce fait. Cette circonstance explique peut-être aussi leurs meilleures performances de croissance. Ils peuvent servir à diversifier avantageusement les pessières pures, au même titre que la réintroduction de feuillus. Grâce à une meilleure humification, ils permettront de rompre une uniformité qui peut s'avérer dangereuse pour la propagation de la pourriture rouge dans les sites prédisposés.

DEUXIEME PARTIE

Conséquences de la monoculture des conifères sur le bilan hydrologique

1. LES COMPOSANTS DU PROBLEME

Les premières recherches sur l'hydrologie forestière ont accrédité l'idée que les forêts consomment plus d'eau que les végétations basses et que le reboisement des incultes et des parcours pastoraux peut avoir une influence négative sur l'alimentation des nappes et du système hydographique. Diverses études ont généralement confirmé ces vues en Europe (BURGER, 1954 ; VALEK, 1959 ; BOCHKOV, 1970), aux Etats-Unis (SWANK et MINER, 1968) et tout récemment en Australie (ALLISON et HUGHES, 1972 ; COLVILLE et HOLMES, 1972).

D'autre part, des mesures comparatives effectuées il y a quelque dix ans ont fait supposer que les monocultures de conifères, telles qu'elles sont pratiquées en Europe tempérée, risquent de réduire le bilan d'eau davantage que les forêts de feuillus qu'elles ont remplacées (NOIRFALISE, 1962, 1964, 1968). A ce propos, des recherches plus approfondies se sont succédés, depuis lors dans divers pays et il nous a paru intéressant d'établir une nouvelle synthèse de leurs résultats.

* * *

On sait que le bilan d'eau d'une forêt est la différence entre la pluie (P) reçue par le dôme et la lame d'eau réévaporée du fait de l'interception par le couvert, la végétation herbacée et la litière et du fait de la transpiration des feuillages. Cette fraction est l'évapotranspiration (ET) du système sol-végétation. Dès lors, la différence (P-ET) exprime la contribution de la pluviosité à l'alimentation des nappes aquifères et du réseau hydrographique. Sous nos climats et pour les sites forestiers, les pertes par ruissellement sont nulles ou négligeables.

La difficulté d'évaluer correctement le bilan d'eau est d'ordre méthodologique. La pluie incidente devrait se mesurer au-dessus du dôme, mais la turbulence des vents à ce niveau rend cette mesure aléatoire ; aussi l'évalue-t-on à découvert, dans une clairière adjacente dont le diamètre doit atteindre 50 à 60 mètres, sous peine d'erreur systématique par défaut ou par excès.

La rétention d'eau par le couvert (interception) peut être déterminée sans difficulté si l'on distribue sous le peuplement un nombre suffisant de pluviomètres (10 à 25, selon le cas) (1), qui recueillent l'eau d'égouttage (Ps), et si l'on mesure en même temps l'écoulement d'eau le long des troncs (Pt), grâce à des colliers récepteurs ajustés sur les fûts. Par contre, nous verrons qu'il est difficile d'évaluer correctement la transpiration par des mesures directes. C'est la raison pour laquelle les hydrologues préfèrent une méthode plus globale qui consiste à déterminer l'écoulement à l'exutoire d'un bassin boisé, grâce à une installation limnigraphique, associée à un réseau de pluviomètres distribués dans le bassin versant. Ce procédé donne directement le bilan (P-ET). Toutefois, il n'est pas toujours aisé de découvrir des sites appropriés permettant de comparer le bilan des feuillus et des conifères.

Un autre procédé consiste à évaluer les variations du stock d'eau dans le sol ou les fluctuations de la nappe perchée dans les sites à pseudogleys.

Dans les pages qui suivent, on envisagera successivement l'interception et la transpiration des peuplements, ainsi que les résultats fournis par les méthodes indirectes qui viennent d'être indiquées.

2. L'INTERCEPTION DE LA PLUIE EN FORET

En forêt, l'interception de la pluie est due pour la quasi-totalité au peuplement ligneux, en raison de l'importante surface réceptrice développée par les feuilles, les rameaux, les branches et les fûts. La rétention de la strate herbacée ou de la litière peut être évaluée sans difficulté par pesée différentielle, mais elle est nettement moins importante (5 % ou moins) et généralement négligée, du fait que dans les climats humides, le ressuyage au sol n'est souvent que très partiel d'une pluie à l'autre.

Pour mesurer l'interception, on évalue séparément l'égouttage sous le peuplement (Ps) et l'écoulement le long des troncs (Pt). L'interception I est donnée par la formule (P - Ps - Pt).

2.1. Le seuil d'égouttage

Le seuil d'égouttage est la hauteur millimétrique que doit atteindre une pluie pour que l'égouttage commence à se manifester dans le sous-bois. Il dépend de l'état de ressuyage du peuplement au moment de la pluie et des

(1) Certains chercheurs ont utilisé des bacs pluviométriques de 2 m de longs et larges de 20 cm (GRUNOW, 1965).

caractéristiques morphométriques du couvert (surface foliaire totale, disposition des feuilles ou des aiguilles, rugosité des écorces). On peut donc obtenir pour ce seuil des valeurs très différentes d'une situation à l'autre. Les plus significatives sont relatives à des peuplements parfaitement ressuyés au moment de l'épisode pluvieux. REYNOLDS et HENDERSON (1967) signalent, pour ces conditions, que l'égouttage commence au moment où la pluie atteint 1,52 mm en été et 2,32 mm en hiver dans une hêtraie de 55 ans et de 1165 tiges/ha. Pour une forêt de mélèze avec quelques chênes (20 ans, 4742 tiges/ha), les seuils sont de 2,65 mm en été et 2,92 mm en hiver. Ces chiffres sont supérieurs aux seuils moyens mentionnés dans diverses études, lesquels s'échelonnent entre 0,3 mm, pour la hêtraie et 0,8 mm pour la pessière, du fait d'un état du ressuyage très variable d'une pluie à l'autre.

Il peut sembler paradoxal pour les essences à feuilles caduques que l'égouttage soit plus précoce en été qu'en hiver, mais la même constatation a été faite par d'autres chercheurs (TRIMBLE et WEITZMANN, 1954 ; NOIRFALISE, 1959 ; LEYTON et CARLISLE, 1959). En réalité, la présence des feuilles facilite l'égouttage en été, tandis qu'en hiver, ce sont les rameaux qui interceptent la pluie et la conduisent de préférence vers les branches et les fûts. Chez les espèces à feuilles caduques, l'écoulement sur les troncs varie donc à l'inverse de l'égouttage. REYNOLDS et HENDERSON (1967) constatent effectivement pour l'exemple cité ci-dessus, que l'écoulement se manifeste à partir d'une hauteur pluviométrique de 1,9 mm en hiver et de 2,65 mm en été pour la hêtraie ; de 3,4 mm en hiver et de 7,95 mm en été pour le peuplement de mélèze.

2.2. Intensité de l'égouttage et caractères de la pluie

Les recherches récentes qui prennent en considération l'étude des pluies individuelles ont permis d'établir la relation entre l'égouttage (Ps) et la *hauteur millimétrique* de la précipitation (P). Au début de l'épisode pluvieux, la relation est curvilinéaire ; elle devient ensuite linéaire et de la forme $Ps = aP + b$. MITSCHERLICH et MOLL (1970) constatent que la relation linéaire se vérifie, pour le sapin de Douglas, à partir du moment où la pluie dépasse 3 mm. L'égouttage est alors donné par l'équation $Ps = 0,85\ P - 1,81$.

Au moment où la relation devient linéaire, on considère que le peuplement est saturé d'eau. Ce taux de saturation exprimé en millimètres de pluie a été établi pour divers types de peuplements (Tableau I). Il est compris entre 1 et 3 mm pour les feuillus, entre 3 et 7 mm pour les conifères. La hauteur de pluie nécessaire pour atteindre cette saturation a été évaluée par BULTOT et al. (1972) en Ardenne : elle est en moyenne de 13 mm pour la hêtraie et de 17 mm pour la pessière.

TABLEAU I. — Taux de saturation des peuplements, en mm de pluie

Essences	Peuplement	Taux de saturation en mm	Auteurs
Hêtre + charme	12,5 m ; 1300 tiges/ha	1,9 ± 0,5 (max. 2,0 mm)	AUSSENAC, 1968 (Lorraine)
Hêtraie	23 m ; 60 ans	1,1 mm	WEIHE, 1968 (Rhénanie)
Hêtraie	20 m ; 281 tiges/ha	1,4 (été) et 2,9 mm (hiver) moyenne 2,6 mm	BULTOT et al. 1972 (Ardenne)
Feuillus canadiens		2 mm	FRASER et GAERTNER, 1961
Pin sylvestre	13 m ; 1250 tiges/ha	3,0 ± 0,8 (max. 3,5 mm)	AUSSENAC, 1968 (Lorraine)
Sapin de Douglas	19,5 m ; 1030 tiges/ha	± 3,0 mm	MITSCHERLICH et MOLL 1970 (Forêt Noire)
Abies grandis	23 m ; 620 tiges/ha	3,8 ± 1,5 (max. 4,5 mm)	AUSSENAC, 1968 (Lorraine)
Epicéa commun	12,5 m ; 2160 tiges/ha	3,1 ± 0,8 (max. 4,0 mm)	AUSSENAC, 1968 (Lorraine)
Epicéa commun	16 m ; 1500 tiges/ha	4,7 - 5,7 mm (moy. 5,2 mm)	BULTOT et al. 1972 (Ardenne)
Epicéa commun	27 m ; 59 ans	6,5 mm	WEIHE, 1968 (Rhénanie)

Toutefois, l'égouttage est aussi influencé par d'autres facteurs. L'*intensité de la pluie* (décharge par unité de temps) peut modifier notablement l'égouttage, pour des hauteurs millimétriques équivalentes. Les chiffres du Tableau II, dûs à MARTIN ARANDA et COUTTS (1963) en sont l'illustration.

TABLEAU II. — Egouttage en fonction de l'intensité des pluies

Hauteur pluviométrique (mm)	Pluies totalisant moins de 10 mm		Pluies totalisant plus de 15 mm	
Intensités des pluies (mm/heure)	moins de 3	plus de 5	moins de 3	plus de 5
Egouttage sous épicéa de Sitka . .	25,9 ± 4,0	57,3 ± 7,4	77,7 ± 16,5	67,2 ± 8,3
Egouttage sous pin sylvestre (%) . .	41,8 ± 4,5	55,6 ± 7,8	63,5 ± 19,2	56,8 ± 9,6

Le *vent* joue également un certain rôle (HEUVELDOP, 1973) et surtout l'*intervalle entre pluies successives*, dont dépend l'état de ressuyage des peuplements. Quelques valeurs sélectionnées par MARTIN ARANDA et COUTTS (1963) (Tableau III) soulignent l'énorme variation possible pour le sapin géant et le pin sylvestre.

TABLEAU III. — Egouttage en % pour des averses de même importance, à intervalles différents

Précipitation (mm)	Dernière pluie	Egouttage en %	
		sous Picea sitchensis	sous Pinus sylvestris
1,3 mm	légère averse 7 jours avant	0	8,9
1,7 mm	forte averse (27,9 mm) la veille	99,7	86,0
7,6 mm	légère averse 6 jours avant	8,0	21,3
7,6 mm	légère averse 2 jours avant	56,6	65,3
10,8 mm	pas de pluie depuis 10 jours	32,1	35,3
10,8 mm	forte averse (26,2 mm) 2 jours avant	72,6	71,0

2.3. L'écoulement le long des troncs

L'écoulement le long des troncs (Pt) varie également en fonction de la hauteur millimétrique des pluies, de leur intensité, de la force du vent et des intervalles qui séparent les pluies successives, mais les relations sont complexes, non linéaires et particulières à chaque individu, selon son espèce, la disposition de sa ramure, l'ampleur de sa cime, la rugosité de son écorce et sa position sociale dans le peuplement (dominant ou dominé).

Aussi les valeurs spécifiques données par les auteurs sont-elles essentiellement contingentes. Si leur détermination est nécessaire pour le calcul de l'interception, il n'y a pas lieu de s'attarder aux variations entre espèces ou individus. On constate toutefois que parmi les essences feuillues, c'est le hêtre (européen ou américain) qui donne lieu aux écoulements les plus précoces et les plus prononcés pour la gamme des pluies modérées (ESCHNER, 1967). Par contre, l'écoulement pour les conifères est toujours faible sinon négligeable, ce qui tient à la disposition des aiguilles et des rameaux et à la rugosité des écorces. C'est particulièrement le cas pour l'épicéa.

2.4. L'interception et ses valeurs

L'interception des peuplements varie en sens inverse mais selon les mêmes facteurs qui gouvernent l'égouttage et l'écoulement, en particulier la hauteur millimétrique (EIDMANN, 1959), l'intensité de la pluie (DELFS, 1967) et la vitesse du vent (HEUVELDOP, 1973). Il existe à cet égard une foule de mesures individuelles qu'on ne peut commenter ici en détail mais qui soulignent l'incidence des facteurs précités. Ainsi DELFS (1967) indique pour une pessière une interception moyenne de 71 % pour les pluies de 2 à 5 mm et 19 % pour les pluies de plus de 25 mm ; une interception de 25 % pour une pluie de 70,5 mm étalée sur 50 heures et une interception de 2 % pour une pluie de

74,6 mm concentrée sur 3 ½ h. Les mesures de BULTOT et al. (1972), pour citer un autre exemple, indiquent que des pluies de 5 mm et de faible intensité (0,6 mm/heure) sont interceptées à raison de 34 % par la hêtraie et de 54 % par la pessière, tandis que des pluies de 5 mm, mais de forte intensité (6 mm/heure), le sont à raison de 24 % (hêtraie) et 38 % (pessière). Lorsqu'aux intensités précitées, la pluie atteint 10 mm, les interceptions sont respectivement de 33 et 19 % pour la hêtraie et de 47 et 27 % pour la pessière.

Divers auteurs ont tenté d'établir un modèle mathématique de l'interception. HEUVELDOP (1973) pour une pessière de la Forêt Noire propose une formulation logarithmique de l'interception en fonction de l'intensité des pluies et de la vitesse du vent :

$$\log I = 1.7481 - 0,2396\ X$$
$$\log I = 1.8976 - 0,2953\ W$$

X étant l'intensité de la pluie exprimée en mm par heure
W l'intensité du vent en mètres par seconde.

Une autre tentative, due à BULTOT et al. (1972) est basée sur les mesures effectuées dans une hêtraie et une pessière du Plateau des Tailles (Ardenne). Les auteurs proposent une fonction parabolique de l'interception :

$$I = a\ P^2 + bP.$$

Pour la pessière qu'ils ont étudiées, $I = -0,0166\ P^2 + 0,5861\ P$ pour les hauteurs pluviométriques (P) inférieures à 17 mm. Pour les pluies supérieures à 17 mm, l'interception devient constante et égale à 5,2 mm, qui est le taux moyen de saturation pour les conditions locales du climat.

Pour la hêtraie, $I = -0,0139\ P^2 + 0,3820\ P$ pour les hauteurs pluviométriques inférieures à 13 mm. Pour les pluies supérieures à 13 mm, l'interception devient constante et égale à 2,6 mm (taux moyen de saturation de la hêtraie).

Des équations plus complexes sont également proposées par ces auteurs pour intégrer, outre la hauteur millimétrique des pluies, leur intensité (en mm par 10 minutes), leur caractère continu ou intermittant et le pouvoir évaporant de l'atmosphère pendant les journées où la pluie s'est produite.

De toute évidence, l'interception d'un type de peuplement donné varie notablement selon les caractères de la pluviosité et l'on peut s'attendre à des résultats différents d'un climat à l'autre selon sa cote udométrique, son régime pluvial et son humidité atmosphérique. Dès lors, les résultats obtenus en Europe Centrale ne sont pas transposables comme tels à l'Europe occidentale et inversément, pas plus que ceux obtenus en plaine ne le sont aux massifs montagneux. Il convient d'en tenir compte dans l'examen du Tableau IV, où nous avons colligé les valeurs annuelles d'interception relatées dans les travaux européens, pour divers types de peuplements.

Sous réserve de ce qu'on vient de dire, le Tableau IV établit une présomption sérieuse suivant laquelle les plantations de conifères interceptent davantage que les forêts de feuillus en sites adjacents ou peu éloignés, recevant la même

pluviosité (1). Pour les feuillus, les valeurs d'interception s'inscrivent dans une fourchette de 7 à 26 % ; pour le pin sylvestre, dans une fourchette de 25 à 32 %, pour les conifères d'ombre (épicéa, sapins), dans une fourchette de 25 à 54 % avec une exception pour l'Ardenne (20 %). Chez les feuillus la rétention par le feuillage est compensée par un écoulement important le long des troncs, tandis que chez les conifères, cet écoulement est nettement plus faible ou insignifiant.

TABLEAU IV. — Valeurs comparatives de l'interception

Auteur et région	PEUPLEMENT	P mm	Ps (% de P)	Pt (% de P)	I (% de P)	Durée
BODEUX, 1954, Campine	Chêne sessile (10-15 m)	849	73,5	7,7	19,1	12 mois
	Pin sylvestre (10-15 m)	849	72	3,0	25,0	12 mois
NOIRFALISE, 1959, Brabant	Chêne-bouleau (10 m) avec sous-bois buissonneux	877	70,2	6,3	23,5	12 mois
EIDMANN, 1959, Ruhr	Hêtraie	1216	75,8	16,6	7,6	48 mois
	Pessière	1216	73,4	0,8	25,8	48 mois
AUSSENAC, 1968, Lorraine	Hêtraie à charme 1300 tiges/ha : 12,5 m	724	76	7,1	16,9	12 mois
	Pin sylvestre 1520 tiges/ha ; 13 m	751	68	1,5	30,5	12 mois
	Abies grandis 620 tiges/ha ; 23 m	882	55,8	1,1	43,1	12 mois
BULTOT et al., 1972, Ardenne	Hêtraie à luzule 281 tiges/ha ; 20 m	1320	—	—	14,2	54 mois
	Pessière 1500 tiges/ha ; 16 m	1320	—	—	20,5	54 mois
BRECHTEL, 1969, Rhénanie	Hêtraie 2100 tiges/ha : 13,7 m	834	62	18	20	13 mois
	Hêtraie 450 tiges/ha : 26,2 m	834	54	20	26,0	13 mois
	Pessière 1400 tiges/ha ; 15,2 m	834	59	1	40,0	13 mois
	Pessière 630 tiges/ha : 25,2 m	834	59	1	40,0	13 mois
	Abies alba 560 tiges/ha ; 25 m	834	60	6	34	13 mois
MITSCHERLICH et MOLL, 1970, Forêt Noire	Hêtraie	1237	64	13	24	12 mois
	Sapin de Douglas					
	800 tiges/ha ; 19,8 m	1237	62	5	33	12 mois
	1090 tiges/ha ; 19,5 m	1237	57	7	36	12 mois
	1257 tiges/ha ; 19,9 m	1237	49	10	41	12 mois
NOIRFALISE, 1959, Ardenne	Hêtraie, 20-25 m	196	—	—	23	mai-juin
	Pessière, 20-25 m	196	—	—	38	mai-juin
RUTTER, 1963, G.B.	Pin sylvestre 4600 tiges/ha ; 5,7 m	796	47,7	14,7	37,6	12 mois
OVINGTON, 1954, Kent (G.B.)	Sapin de Douglas 1700 tiges/ha ; 13,4 m	—	45,9	0,1	54	12 mois
	Abies grandis 2441 tiges/ha ; 14,3 m	—	49,1	0,1	50,8	12 mois
LAW, 1958, G.B.	Epicéa de Sitka	990	—	—	31,6	12 mois

(1) C'est aussi la conclusion des travaux américains (HELVEY, 1971).

L'écart entre hêtraie, pessière ou sapinière est intéressant à considérer pour le propos qui nous concerne. Dans le climat pluvieux et très humide de la haute Ardenne (1300 mm), l'écart est de 6,3 % (± 80 mm). Dans les climats moins humides ou plus chauds, l'écart est plus élevé : 11 à 18 % pour la Forêt Noire, 18,2 % pour la Ruhr, 14 à 20 % en Rhénanie et 26 % en Lorraine, soit des interceptions comprises entre 130 et 220 mm selon les pluviosités de ces régions.

2.5. **Les valeurs saisonnières de l'interception**

On serait naturellement tenté d'attribuer les valeurs moindres d'interception des feuillus au fait qu'ils sont dépouillés de leur feuillage pendant la saison froide. Or, paradoxalement, l'écart d'interception est précisément plus accusé en été qu'en hiver, comme le montre les chiffres du Tableau V.

TABLEAU V. — Interceptions saisonnières

	Hêtraie	Pessière	Différence
Sauerland (EIDMANN 1959)			
— période estivale (mai-octobre) : (629 mm de pluie)	10,8 %	31,2 %	+ 20,4 %
— période hivernale (novembre-avril) : (587 mm de pluie)	4,3 %	20,3 %	+ 15,8 %
— année (1216 mm)	7,6 %	25,8 %	+ 18,2 %
Ardenne (BULTOT et al. 1972).			
— période estivale (mai-octobre) : (629 mm de pluie)	21 %	31 %	+ 20 %
— période hivernale (novembre-avril) : (691 mm de pluie)	8 %	11 %	+ 3 %
— année (1320 mm)	14,2 %	20,5 %	+ 6,3 %

Cette apparente anomalie tient pour une bonne part aux différences saisonnières du régime de pluviosité. WHITE et CARLISLE (1968) ont comparé, pour des feuillus en mélange, l'interception d'un mois d'été et d'un mois d'hiver à pluviosités quasi égales (105 et 96 mm) et ont obtenus des valeurs très proches, respectivement de 7,8 et 8,6 % ; en été, l'égouttage a été plus élevé qu'en hiver (83,1 et 78,9 %) mais l'écoulement le long des troncs plus faible (9,1 et 12,5 %) ; les deux mécanismes se sont partiellement compensés.

Dans les régions où le régime de pluviosité varie peu selon la saison, les interceptions estivales et hivernales sont donc peu contrastées. AUSSENAC (1968) n'obtient qu'une différence de + 1,8 % pour l'été par rapport à l'hiver, dans un gaulis de hêtre en Lorraine, et MITSCHERLICH et MOLL (1968) ne constatent aucune différence dans une hêtraie de la Forêt Noire. L'influence décisive du régime pluvial est fort bien explicitée par l'exemple suivant : MITSCHERLICH et MOLL (1968) constatent dans une douglasière de la Forêt

Noire une interception estivale plus faible qu'en hiver (— 15,5 %) tandis que MAC MINN (1960) dans la région de Vancouver relève, également pour une douglasière, une interception estivale beaucoup plus élevée (+ 25 à + 52 %).

Ces quelques commentaires soulignent toute l'importance du régime des pluies dans l'interception et les erreurs auxquelles on s'exposerait en extrapolant à des contrées différentes les résultats obtenus en un lieu déterminé.

2.6. **Influence des densités de peuplement sur l'interception**

Il est naturel de supposer que l'interception varie en fonction de la densité des peuplements, mais les recherches systématiques à cet égard sont encore très récentes en Europe. La densité du peuplement peut s'exprimer par le nombre de tiges à l'hectare ou mieux par la surface terrière du peuplement en m^2 par ha. Dès 1948, WILM et DUNFORD ont montré pour des pinèdes de Pinus Contorta (Colorado) que l'interception de la pluie et de la neige augmentaient avec la surface terrière (Tableau VI).

TABLEAU VI. — Interception des pinèdes de Pinus contorta

Surface terrière, en m^2/ha	9,2	15,0	15,1	22,0	36,5
Interception de pluies, en %	5,3	12,1	12,7	17,6	29,6
Interception des neiges, en %	12,5	18,2	20,3	23,4	32,0

MITSCHERLICH et MOLL (1970) constatent le même fait pour les douglasières et les hêtraies qu'ils ont étudiées dans la Forêt Noire (Tableau VII).

TABLEAU VII. — Interception des douglasières et hêtraies en fonction de la surface terrière

	Douglasières							Hêtraies	
Age des peuplements (ans)	13	29	35	29	40	35	35	40	80
Hauteur moyenne des arbres	9,1	18,2	19,8	17,2	24,5	19.5	19,9	17,5	14 à 24
Nombre de tiges/ha	2308	1267	800	2016	533	1090	1257	1167	848
Surface terrière, m^2/ha	21,4	31,2	33,9	39,0	39,3	40,2	48,5	27,6	39,3
Type d'éclaircie	nulle	forte	forte	faible	forte	moyenne	faible	forte	moyenne
Eté :									
égouttage %	57	68	69	60	65	63	54	63	71
écoulement %	13	7	5	11	4	8	11	13	3
interception %	30	25	26	29	31	29	35	24	26
Hiver :									
égouttage %	53	55	53	46	52	49	41	64	61
écoulement %	12	6	5	8	4	7	9	12	3
interception %	35	39	43	45	44	44	51	24	36
Année :									
égouttage %	55	63	62	54	59	57	49	64	67
écoulement %	13	7	5	10	4	7	19	13	3
interception %	32	30	33	36	36	36	41	24	30

BRECHTEL (1969) a également publié des observations pour la seule période de végétation (mars - octobre), qui se rapportent à 5 peuplements situés en Rhénanie (Tableau VIII).

TABLEAU VIII. — Interception dans les hêtraies et pessières de densité différente (mars-octobre, 13 mois)

	Hêtraies		Pessières		Sapinières
Age (années)	24	98	54	63	63
Hauteur moyenne (m)	13,7	26,2	15,2	25,2	25
Nombre de tiges/ha	2100	450	1400	630	560
Surface terrière m^2/ha	20	32	35	45	42
Egouttage %	62 %	54 %	59 %	59 %	60 %
Ecoulement %	18 %	20 %	1 %	1 %	6 %
Interception %	20 %	26 %	40 %	40 %	34 %

De ces données, il résulte que l'interception tend effectivement à augmenter avec la surface terrière des peuplements chez le sapin de Douglas et le hêtre, tandis que les résultats paraissent plus stables pour l'épicéa. Dans les douglasières et les hêtraies au stade du perchis, l'éclaircie forte peut réduire l'interception de 3 à 6 % par rapport à l'éclaircie faible. Le sylviculteur peut donc moduler l'interception par des éclaircies précoces et répétées, mais celles-ci n'ont qu'un effet temporaire, puisque le couvert se referme peu à peu. Il est aussi vraisemblable que l'éclaircie par le bas — portant sur les dominés — est beaucoup moins efficace que l'éclaircie dans les co-dominants.

3. LA TRANSPIRATION DES PEUPLEMENTS FORESTIERS

La quasi-totalité de l'eau transpirée en forêt est vaporisée au niveau des feuillages du peuplement ligneux. La contribution de la végétation herbacée est négligeable dans les forêts denses, si l'on tient compte de l'atmosphère confinée, humide et ombreuse du sous-bois. La transpiration des arbres in situ est difficile à mesurer et l'on ne peut guère se livrer qu'à des sondages comparatifs entre essences. Les comparaisons par la technique des vases de végétation, en serre ou à l'extérieur, outre qu'elles se limitent à de jeunes sujets, ne permettent pas de préjuger des résultats en conditions naturelles.

3.1. Les évaluations par pesées instantanées

Un premier procédé consiste à couper des rameaux feuillés que l'on pèse instantanément. On les replace ensuite à l'endroit du prélèvement pendant 2 ou 3 minutes et on les repèse. La perte de poids correspond à l'eau transpirée dans ce court laps de temps, pendant lequel on admet que l'ouverture des

stomates et l'état d'hydratation de la feuille n'ont pas varié au point d'affecter l'intensité transpiratoire. Le procédé a été utilisé de longue date par les physiologistes et appliqué aux arbres par SCHUBERT (1939), STALFELT (1944), POLSTER (1950) et PISEK (1954).

POLSTER a effectué des mesures comparatives sur diverses essences, par journées de beau temps. Les résultats obtenus par unité de poids foliaire ont été extrapolés au peuplement, connaissant sa masse foliaire totale (Tableaux IX).

TABLEAU IX. — Transpiration de quelques essences par journées de beau temps (POLSTER, 1950)

	Transpiration journalière par gr de poids foliaire	Transpiration journalière du peuplement
Bouleau	9,5 gr	4700 l/ha ou 4,7 mm
Hêtre	4,83 gr	3800 l/ha ou 3,8 mm
Mélèze	3,24 gr	4700 l/ha ou 4,7 mm
Pin sylvestre . . .	1,88 gr	2350 l/ha ou 2,35 mm
Epicéa	1,39 gr	4300 l/ha ou 4,3 mm
Sapin de Douglas . .	1,33 gr	5300 l/ha ou 5,3 mm

PISEK (1954) obtient un classement semblable et des valeurs journalières de même ordre, sauf pour le hêtre (2,2 mm au lieu de 3,8 mm).

Ces résultats montrent qu'à poids égal les feuilles transpirent plus que les aiguilles de conifères, ce qui s'explique sans difficulté par la xéromorphie des aiguilles chez le pin, l'épicéa et le sapin de Douglas. Mais en raison des masses foliaires respectives, l'ordre se trouve inversé si l'on considère les peuplements. Pour POLSTER, la pessière évapore 24 % de plus que la hêtraie et pour PISEK (1954), 72 % de plus.

Certes, l'extrapolation des mesures ponctuelles peut paraître hasardeuse, mais lorsque les rameaux testés sont bien répartis dans l'ensemble du couvert, l'approximation peut devenir satisfaisante. Néanmoins, les aléas sont évidents et cette voie de recherche ne semble pas avoir été poursuivie dans les dernières années.

3.2. **Le flux transpiratoire des arbres**

LADEFOGED (1960, 1963) a utilisé au Danemark une méthode originale qui permet de mesurer le débit de sève des arbres in situ. Le tronc est chauffé en un point par une résistance électrique et des thermocouples détectent le déplacement du flux de sève chaude au-dessus de ce point. « In fine » pour pouvoir calculer les débits correspondants de sève et tarer les données thermiques, l'arbre est coupé sous eau et l'on mesure l'absorption correspondant aux vitesses de flux données par les thermo-couples. L'auteur a étudié « in situ »

10 hêtres, 9 chênes sessiles, 8 épicéas, 7 frênes, 2 érables sycomores, un bouleau et un peuplier (Populus serotina), d'âge, de taille, de dimension de couronne et de masse foliaire différentes.

Les variations individuelles sont naturellement notables. Elles sont principalement liées à la dimension de la couronne et à la position sociale des arbres (dominants ou dominés). Les fluctuations d'un jour à l'autre sont également importantes et surtout influencées par le rayonnement solaire et la sécheresse de l'air, qui sont les deux composantes majeures du pouvoir évaporant du climat. Comme ces conditions ne sont pas identiques d'une journée à l'autre, l'auteur n'a pu établir un parallèle rigoureux entre essences, les mesures ayant été faites à des dates différentes, tantôt par beau temps, tantôt par temps plus ou moins couvert. Enfin, l'auteur a constaté que les feuillus transpirent le plus du début de la feuillaison à la mi-août, les conifères de juin à la mi-août ; mais ceux-ci peuvent aussi transpirer de manière appréciable dès le début d'avril et jusqu'à la mi-novembre.

Des résultats publiés par LADEFOGED, nous retiendrons ceux qui concernent le hêtre et l'épicéa (Tableau X).

TABLEAU X. — Transpiration comparée du hêtre et de l'épicéa

	Transpiration par arbre (litres/24 heures)	Transpiration du peuplement en mm/24 heures A	B
	(par m² de surface foliaire)		
Hêtre :			
Journées ensoleillées	0,52 - 0,72	3,55 à 4,01	3,57 à 4,06
Journées variables	0,39 - 0,60	3,02 à 3,14	3,05 à 3,16
Journées nébuleuses	0,30 - 0,43	1,88	1,91
Journées d'automne (sept.)	0,30 - 0,43	2,6	—
	(par kg d'aiguilles)		
Epicéa :			
Journées ensoleillées	1,76 - 2,79	3,75 à 3,78	3,34 à 3,37
Journées variables	1,11 - 1,80	2,21 à 2,52	1,97 à 2,26
Journées nébuleuses	0,67 - 0,98	1,37	1,23
Journées d'automne (sept.)	0,54 - 0,95	1,2 à 1,26	1,08 à 1,13

A. extrapolation basée sur la surface des couronnes.
B. extrapolation basée sur le nombre de tiges.

Il est remarquable que les valeurs obtenues pour le hêtre coïncident assez bien avec celles de POLSTER (1950) qui indiquent une valeur de 3,8 mm pour des journées ensoleillées. Par contre, pour l'épicéa, les valeurs de LADEFOGED sont systématiquement inférieures à celles de POLSTER (4,3 mm), à celles de PISEK (4,4 mm) et à celles de SCHUBERT (4,9 mm). En d'autres termes, pour LADEFOGED, l'épicéa transpire 20 à 25 % de moins que le hêtre pour les sujets

dominants et 17 % de moins pour l'ensemble des sujets examinés (dominants et dominés). Il faut sans doute apporter à ces chiffres un correctif, puisque les conifères transpirent dès avant et après l'époque de feuillaison du hêtre. Mais cette compensation n'est certainement que partielle.

Les résultats contradictoires ainsi obtenus pour l'épicéa avec les deux méthodes méritent un bref commentaire. D'une part, l'épicéa transpire moins que le hêtre par unité de poids foliaire mais davantage par unité d'étendue du peuplement (POLSTER, 1950, Tableau IX). Peut-être l'extrapolation des mesures ponctuelles en pessière tient-elle insuffisamment compte de la proportion des rameaux fortement ombragés, car on constate dans le Tableau X que, par temps nébuleux, la transpiration est réduite d'environ 40 % pour le hêtre mais de 60 % à 70 % pour l'épicéa. D'autre part, la nébulosité moyenne en Europe occidentale pendant l'été étant de 0,5, le facteur de réduction précité joue à peu près un jour sur deux. Un simple calcul (1) montre qu'en appliquant ce facteur de pondération, on arrive à la conclusion que pour l'ensemble de la saison de végétation, la pessière transpire 12 % de moins que la hêtraie.

Certes, il conviendrait aussi d'invoquer un argument « a contrario » basé sur le bilan d'énergie.

Ce dernier est plus élevé d'environ 5 % au niveau de la pessière, en raison d'un albedo plus faible. De ce fait, l'évaporabilité est de quelque 5 % supérieure par rapport à la hêtraie, mais le xéromorphisme foliaire de l'épicéa compense peut-être partiellement ce surplus théorique, par son action freinante sur les échanges de vapeur.

Quoi qu'il en soit, l'indétermination ne peut être réellement levée que par de nouvelles recherches expérimentales. A l'heure actuelle et sur la seule base des raisonnements exposés ci-dessus, on peut tout au plus avancer que l'écart transpiratoire de la pessière par rapport à la hêtraie s'inscrit vraisemblablement dans la fourchette de — 12 % à + 5 %, l'écart négatif étant plus vraisemblable que l'écart positif. Un écart de — 12 % équivaut pour la pessière à une économie transpiratoire de 100 à 120 mm, chiffre qu'il faut rapprocher du surplus d'interception, à savoir 130 à 220 mm pour les climats à pluviosité modérée, du type de ceux où les mesures transpiratoires ont été effectuées.

4. LES MESURES DIRECTES DU BILAN D'EAU

L'indétermination des résultats transpiratoires a orienté les recherches vers les procédés d'évaluation globale du bilan d'eau, soit par le procédé lysimétrique, soit par la mesure des variations du stock d'eau, soit enfin par les bilans d'écoulement des bassins.

---

(1) Hêtraie : 180 j. à 3,75 mm + 180 j. à 1,91 mm = 1019 mm.
Pessière : 180 j. à 3,75 mm + 180 j. à 1,23 mm = 896 mm.
Différence en faveur de l'épicéa : soit 123 mm ou 12 %.

4.1. Les résultats lysimétriques

WIND (1958) a publié les résultats obtenus au moyen des lysimètres de sable dunal, à Castricum (Pays-Bas) ; l'un des lysimètres était planté de jeunes chênes (1 m à 1,8 m) et l'autre de jeunes pins (2,2 m à 3,75 m). Pour 5 années d'observation, on constate sous chênaie un écoulement de 47,2 % et une évapotranspiration de 52,8 % du total des pluies (856 mm). Sous pinède, les valeurs sont respectivement de 27,9 et 72,1 %. L'écart d'écoulement est de 20,6 % ou 176 mm en faveur du chêne. On peut toutefois objecter que la pinède étant plus élevée que la chênaie, elle a pu bénéficier d'apports advectifs de chaleur, de sorte qu'on ne peut extrapoler les résultats à d'autres situations. Les valeurs de WIND pour la pinède concordent cependant avec celles de RUTTER (1959) obtenus en Grande-Bretagne pour un peuplement de 7 à 10 m de hauteur, par la mesure des variations du stock d'eau : l'évapotranspiration s'est chiffrée à 596 mm contre 617 mm à Castricum.

Le bilan notablement déficitaire de la pinède correspond ici à une pluviosité assez faible (856 mm), condition propice à une forte interception.

4.2. Les fluctuations du stock d'eau dans le sol

LEVY (1969) a suivi pendant deux années, dans 7 sols lorrains limono-argileux à pseudogley, les fluctuations de l'épaisseur de la nappe perchée sous forêt de feuillus (chênaie ou chênaie-hêtraie : 7 stations) et sous divers peuplements de conifères (quatre pessières, deux pinèdes de pin sylvestre et une sapinière d'Abies grandis). Les mesures piezométriques ont été effectuées du début de l'hiver jusqu'au moment de la disparition estivale de la nappe. De cette étude, on peut déduire les résultats suivants :

— pendant la période de recharge hivernale des nappes (janvier ou février), celles-ci n'ont pas montré un niveau significativement différent sous des peuplements adjacents de feuillus et de conifères ;
— à partir de mars, moment auquel les conifères commencent à transpirer, le niveau de la nappe s'abaisse davantage et plus rapidement sous conifères que sous feuillus ; inversément, lors d'épisodes pluvieux, la nappe se relève moins vite sous conifères que sous feuillus ;
— pendant les phases de sécheresse, la nappe perchée disparaît plus tôt sous conifères que sous feuillus. En conséquence, la durée d'engorgement du profil est moins longue sous conifères. A 10 cm de profondeur, on note 35 jours d'engorgement sous feuillus et 0 jour sous conifères ; à 20 cm, les durées respectives d'engorgement sont de 132 et 66 jours et, à 30 cm, de 160 et 77 jours ;
— les durées d'engorgement ont été plus longues sous pin sylvestre que sous épicéa ou sapin géant.

Les différences d'épaisseur de la nappe sous conifères et feuillus correspondent, compte tenu de la capacité hydrique des sols concernés, à un surplus d'alimentation en eau de 0,66 mm par jour sous feuillus par

rapport aux conifères, ce qui représente pour la période considérée (144 jours, de février à juin) un équivalent pluviométrique de 75,2 mm pour une pluviosité de 262,2 mm, soit un surplus de 28 % en faveur des feuillus.

Ajoutons que BENECKE et MAYER (1971) ont suivi au moyen de 500 tensiomètres les variations de l'humidité du sol sous des couronnes d'épicéa et de hêtre, dans la région de Göttingen. Ils ont constaté que la teneur en eau du sol n'a pas varié au-delà de 1 m de profondeur mais que l'assèchement a été plus prononcé sous épicéa que sous hêtre dans les horizons plus superficiels du sol. AUSSENAC (1972) a appliqué la même méthode que LEVY pour comparer la consommation d'eau de quatre peuplements (épicéa, pin sylvestre, Abies Grandis et hêtraie à charme) pendant 3 années (1967-1969). Les résultats obtenus contredisent ceux de LEVY. Ils sont résumés dans le Tableau XI.

TABLEAU XI. — Evapotranspiration de quatre peuplements lorrains

	Epicéa	Pin	Abies Grandis	Hêtre-Charme
Age	24 ans	29 ans	33 ans	30 ans
Hauteur	12,5 m	13 m	23 m	12,5 m
Nombre tiges/ha	2160	1520	620	1300
Durée de la disparition de la nappe				
en jours : 1967	70 j	182 j	184 j	178 j
1968	62 j	133 j	173 j	239 j
1969	189 j	200 j	238 j	245 j
Evapotranspiration correspondante				
en mm d'eau : 1967	465,8	516,5	497,5	515,9
1968	428,7	472,8	524,9	536,8
1969	509,0	525,9	556,0	560,2

Selon l'auteur, les différences d'évapotranspiration s'expliquent en partie par des différences de hauteur et de situation. Le peuplement d'Abies grandis en raison de sa taille, et celui du hêtre en raison de sa situation ont vraisemblablement bénéficié d'apports advectifs de chaleur, ce qui expliquerait leur forte consommation d'eau. Par rapport à l'évapotranspiration potentielle du gazon, mesurée à Nancy, la pessière a consommé 104 %, le pin sylvestre 113 %, le sapin géant 118 % et la hêtraie 120 %. La faible consommation de l'épicéa est attribuée dans le cas présent à la jeunesse des sujets.

4.3. Les bilans d'écoulement

Le bilan d'écoulement des bassins boisés échappe peut-être mieux aux aléas des méthodes précédentes, parce qu'il met en jeu des surfaces plus étendues. Toutefois, à notre connaissance, aucun protocole n'a encore mis en comparaison la hêtraie et la pessière.

LAW (1958) a étudié l'écoulement d'un site boisé d'épicea de Sitka sur un sol imperméable, en Grande-Bertagne. Pour une pluviosité de 900 mm, l'écoule-

ment fut de 279 mm (28,2 %) et l'évapotranspiration de 711 mm (71,8 %). Celle-ci se décompose à raison de 31,6 % pour l'interception, 34,3 % pour la transpiration et 5,8 % pour l'évaporation au sol.

Une expérience récente et bien organisée conduite par SWANK et DOUGLAS (1974) au Laboratoire hydrologique de Coweeta, dans les Appalaches (Caroline du Nord, USA) a mis en comparaison pendant 18 ans un petit bassin hydrographique ; d'abord couvert de feuillus (chène-caryer), puis planté après coupe à blanc par du pin Weymouth (*Pinus strobus*). Dès le moment où le couvert de la pinède s'est fermé, l'écoulement annuel du bassin enrésiné a diminué d'un équivalent pluviométrique de quelque 200 mm. Ce déficit d'écoulement représente environ 10 % des précipitations de la région. Les auteurs l'attribuent essentiellement à l'interception plus grande de la pinède, mais étant donné la forte pluviosité (1700 à 2500 mm) et le régime des pluies de la région, on peut se demander si la transpiration n'intervient pas pour une certaine part, compte tenu des caractéristiques foliaires du pin de Weymouth (aiguilles longues, nombreuses et modérément xéromorphes).

5. CONCLUSIONS

Au terme de cette analyse, on ne peut s'empêcher de constater que l'influence respective des feuillus et des conifères sur le bilan d'eau est sujet à certaines incertitudes touchant la transpiration des peuplements. Par contre, les données relatives à l'interception sont plus cohérentes. On peut attribuer à l'épicéa un pouvoir d'interception plus élevé que celui du hêtre, l'écart dépendant du régime pluvial : ± 6 % de 1300 mm dans un climat très humide comme la haute Ardenne, soit environ 80 mm par an ; ± 20 % de 800 à 900 mm pour des régions plus basses et moins pluvieuses, ce qui représente 160 à 180 m d'interception par année. Pour la basse et moyenne Ardenne (1000 à 1200 m), l'interception se situe vraisemblablement entre 10 et 15 %, ce qui représente quelque 120 à 150 mm par année.

Dans quelle mesure ces écarts d'interception sont-ils compensés par les différences de transpiration ? Tout incline à croire que les pessières ne transpirent pas davantage sinon même un peu moins que les hêtraies, malgré la persistance des aiguilles. Dès lors, les déficits du bilan d'eau seraient essentiellement dûs à l'interception. C'est la conclusion même de la seule étude hydrologique (SWANK et DOUGLAS, 1974) qui met directement en comparaison des feuillus et un conifère.

S'il en est ainsi, on peut considérer que le déficit du bilan de l'épicéa par rapport au hêtre, dans les conditions du climat ardennais s'inscrit dans une fourchette de 80 à 150 mm, pour des pluviosités allant de 1300 à 1000 mm, soit 120 mm comme valeur moyenne. Les valeurs de 80, 120 et 150 mm représentent une sur-consommation d'eau de 800, 1200 et 1500 m^3 par ha et par année, qu'il est peut-être possible de diminuer légèrement par des éclaircies précoces et répétées.

Pour transposer ces conclusions sur le plan économique, il convient de calculer à quel prix est rentabilisée la perte d'eau.
Pour cela, nous adopterons deux hypothèses :

— celle d'une hêtraie et d'une pessière de haute Ardenne, sur sols relativement peu fertiles, où l'écart de consommation est de l'ordre de 80 mm ou 800 m^3/hectare-année ;
— celle d'une hêtraie et d'une pessière de moyenne Ardenne, sur sols plus fertiles, où l'écart de consommation pourrait-être de 100 à 120 mm ou 1000 à 1200 m^3/hectare-année (Tableau XII).

TABLEAU XII. — Calcul de la valorisation de l'eau en Ardenne

	Hêtraie (révolution 160 ans)		Pessière (révolution 80 ans)	
A. HAUTE ARDENNE				
Production totale pour la révolution	640 m^3		720 m^3	
Accroissement moyen annuel	4 m^3		9 m^3	
Valorisation des produits				
— bois d'éclaircie	320 m^3 × 200 F =	64.000	260 m^3 × 300 F =	78.000
— bois de sciage	320 m^3 × 400 F =	128.000	460 m^3 × 750 F =	345.000
— total	640 m^3 =	192.000	720 m^3 =	423.000
Rapport annuel	192.000 : 160 = par hectare	1200 F	423.000 : 80 = par hectare	5288 F
Valorisation de l'eau par l'épicéa	(5288 — 1200) : 800 m^3 = 5,11 F le m^3			
B. MOYENNE ARDENNE				
Production totale pour la révolution	960 m^3		960 m^3	
Accroissement moyen annuel	6 m^3		12 m^3	
Valorisation des produits				
— bois d'éclaircie	480 m^3 × 200 F =	96.000	340 m^3 × 300 F =	102.000
— bois de sciage	480 m^3 × 600 F =	288.000	620 m^3 × 750 F =	465.000
— total	960 m^3 =	384.000	960 m^3 =	567.000
Rapport annuel	384.000 : 160 = par hectare	2400 F	567.000 : 80 = par hectare	7088 F
Valorisation de l'eau par l'épicéa	(7088 — 2400) : 1000 m^3 = 4,69 F le m^3 (7088 — 2400) : 1200 m^3 = 3,91 F le m^3			

On peut donc raisonnablement admettre que la culture intensive des conifères, de l'épicéa en particulier, valorise le surplus d'eau consommée à plus de 5 F le m^3 en haute Ardenne et à environ 4 F le m^3 en moyenne et basse Ardenne. La question est donc posée de savoir si d'autres activités économiques pourraient effectivement valoriser le surplus d'eau ainsi consommé à meilleur compte pour l'économie wallonne.

BIBLIOGRAPHIE

REFERENCES CITEES DANS LA PREMIERE PARTIE

AMBROZ (1954) — Sborn. csl. Akad. zemed 27 (5), 385-400.
AUSSENAC G. (1969) — Oecol. Plant. 4 (3), 225-236.
BARNAT (1954) — Preslia 26 (3), 227-284.
BASSUS W. (1962) — Nematologica 7 (4), 281-293.
BAUZON D., van den DRIESSCHE R., DOMMERGUES Y. (1969) — Oecol. Plant. 4 (2), 99-122.
BAYENS J. (1954) — Pédologie forestière, Cours U.C. Louvain.
BECK G., DOMMERGUES Y. et al. (1969) — Oecol. Plant. 4 (3), 237-266.
BENECKE P. et BABEL U. (1969) — Mitt. Verein. für Forstliche Standortk. u. Forstpfl. 19, 81-89.
BLUME H. et DIETERICH H. (1969) — Mitt. Verein. für Forstliche Standortk. u. Forstpfl. 19, 92-105.
BONNEAU M. (1973) — Revue Forest. Franç. 4, 259-268.
BONNEVIE-SVENDSEN et GJEMS (1957) — Medd. Norsk. Skogforsøksv. 14 (48), 111-175.
BORNEBUSCH (1953) — Dansk. Skovper. Tidskr. 38 (9), 557-559.
BÖSENER R. (1965) — Wiss. Z. Tech. Univ. Dresden 14 (3), 741-746.
BRAY J.R. et GORHAM E. (1964) — Adv. Ecol. Research 2, 101-157.
BROUWERS L. (1957) — Bull. Inst. Agr. et Stat. Rech. Gembloux 25 (1-2), 38-43.
BRUCKERT S., TOUTAIN F., TCHIKAYA J. et JACQUIN F. (1971) — Oecol. Plant. 6 (4), 329-339.
BUBLITZ (1959) — Forstarch. 30 (6), 105-110.
DELECOUR F., WEISSEN F. et NANSON A. (1967) — Bull. Rech. Agr. Gembloux II (3), 429-449.
DENAYER-DESMET S. et DUVIGNEAUD P. (1972) — Bull. Soc. Roy. Bot. Belg. 105 (1), 197-205.
DIETRICH H. (1963) — Arch. Forstw. 12 (10), 1116-1136.
DOMMERGUES Y. et MANGENOT F. (1970) — Ecologie microbienne du sol, Masson Paris, 796 p.
DUCHAUFOUR P. et BONNEAU M. (1960) — Revue For. Franç. 12 (4), 250-256.
DUCHAUFOUR P. et BONNEAU M. (1961) — Revue For. Franç. 13 (12), 793-799.
DUVIGNEAUD P. et al. (1972) — Bull. Soc. Roy. Bot. Belg. 105 (1), 183-195.
EGOROVA S.V. et RAGUOTIS A.D. (1968) — Lesoved, Moskva 1, 27-36.
EVERS H. (1969) — Mitt. Verein. für Forstliche Standortk. u. Forstpfl. 19, 90-91.
FEHER (1933) — Untersuchung über die Mikrobiologie des Waldbodens, Berlin.
FRANZ (1950) — Bodensoziologie als grundlage der Bodenpflege, Akad. Verlag, Berlin.
GALOUX A. (1953) — Trav. Stat. Rech. Groenendaal Série A n° 8, 95 p.
GASPARD Ch. (1973) — Bull. Rech. Agr. Gembloux, Vol. hors série, 311--328.
GENSSLER H. (1959) — Veränderungen von Boden und Vegetation nach generationsweisen Fichtenanbaü. Diss. Hann-Münden.
HARTMANN (1952) — Forstökologie, Fromme, Vienne.
HARTMANN (1960) — Cbl. Ges. Forstw. 77 (4).
HAUSSER K. (1964) — Mitt. Verein. für Forstliche Standortsk. u. Forstpfl.
JAMAGNE M. (1973) — Thèse doctorale, Gembloux, 524 p.
KASTNER C. et FIEDLER H. (1970) — Arch. Forstw. 19 (9/10), 981-1006.
KOVALE L.S. et EVSEEVA R. (1964) — Lesn. Hoz. 17 (5), 28-31.
KRASILJNIKOV et al. (1955) — Izv. Akad. Nauk. SSSR 3. 33-48.
KRAUSS G.A. (1939) — Forstarchiv., 85-93.
KUNDLER P. (1963) — Arch. Forstw. 12 (7), 659-675.
MANIL G. et al. (1963) — Bull. Inst. Agr. et Stat. Rech. Gembloux 31, 28-102 et 183-222.
MANIL G. (1973) — Communication orale.
MARAN (1959) — Vestn. sel. hoz. nauki, Moskva, 4 (10).
MEYER (1960) — Arch. f. Mikrobiol., 35.
MIHAI (1971) — 15 th. IUFRO Congrès, 8 p.
MIKOLA (1954-1956) — Comm. Inst. for. Fenn. 42 (7), 43 (1), 48 (2).

MOREAU (1959) — C.R. Acad. Sci. Paris, 249 (12).
NAUMOV Z. et ANTONOV G. (1970) — Gorkostop Nauka 7 (1), 79-84.
NEF L. (1957) — Agricultura V (3), 245-316.
NOIRFALISE A. (1956) — Bull. Inst. Agr. et Stat. Rech. Gembloux 24 (2), 208-239.
NOIRFALISE A. (1964) — Conseil de l'Europe, EXP/NAT/WPI (64) 4, 36 p.
NIHLGÅRD B.J. (1970) — Univ. of. Lund, 139 p.
NIHLGÅRD B.J. (1971) — Oikos 22 (3), 302-314.
NIHLGÅRD B.J. (1972) — Oikos 23 (1), 69-81.
NOIRFALIZE A. et THILL A. (1975) — C.E.F., IRSIA, Gembloux, 9 p.
OVINGTON J. (1954) — J. Ecol. 42 (1), 71-80.
OVINGTON J. (1959) — Ann. Bot. London 23 (90), 229-239.
PAGE G. (1968) — Commonw. For. Rev. 47 (1), 52-62.
PAVARI et al. (1953) — Proc. Congr. Int. For. Res. Org. Rome, Sect 21 (11).
PSCHORN-WALKER (1958) — Mitt. forstl. Vers. Anst. Mariabrunn, 48.
RABELER W. (1962) — Rapport inédit.
RADU et al. (1962) — Studii si cercetaria de Biologie XIII (2), 231-258.
RONDE G. (1954) — Forstw. Centralblatt 73, 113-126.
RONDE G. (1957) — Forstw. Centralblatt 76, 95-126.
RUDNOV et al. (1960) — Soobsc. Lab. Lesored, Moskva 2.
SONN S.W. (1960) — Fischer Verlag, Jena, 166 p.
SCHLENKER G. et al. (1969) — Mitt. Verein für Forstliche Standortk. u. Forstpfl. 19, 72-114.
SCHLENKER G. et al. (1971) — Mitt. Verein für Forstliche Standortk. u. Forstpfl. 20, 60-66.
SIMONART P. et HUYGH A. (1953) — Agricultura I (1), 33-51 et 52-75.
SIZOVA et SUPRUN (1962) — Bjull. Mosk. Obsc. Ipyt. Prir. 67 (5).
SKRYNNIKOVA (1958) — Pocvoved, 4.
SMIRNOVA et GROMASEVA (1955) — Pocvoved, 6.
TOUTAIN E. et DUCHAUFOUR P. (1970) — Ann. Sci. Forest. 27, 39-61.
ULRICH B. et al. (1971) — Ecological studies, Springer Verslag, Berlin 2, 171-190.
VAJCIS (1958) — Pocvoved, 5.
VERIGINA (1958) — Pocvoved, 5.
VINOKUROV M. et MIRONOV N. (1967) — Biol. Nauki, Moskva 10 (6), 149-152.
ZEZSCHWITZ E. (1969) — Fortschritte in der Geologie von Rheinland und Westfalen, Krefeld 16, 143-174.
WARTERESIEWICZ (1954) — Ekologia Polska 2 (1).
WERNER G. (1964) — Standort, Wald und Waldwirtschaft in Oberschwaben, Stuttgart 55-68.
WITTICH W. (1953) — Sch. Reihe forstl. Fak. Univ. Göttingen, 9.
WITTICH W. (1959) — Der Wald braucht Kalk, Kölner Univ. Verlag.
WITTICH W. (1961) — Forsch. u. Berat. Forstwitsch. 4.
WITTICH W. 1963) — Schr. Reihe forstl. Fak. Univ. Göttingen 30, 3-60.

REFERENCES CITEES DANS LA DEUXIEME PARTIE

ALLISON G. et HUGHES M. (1972) — Journal of Hydrology, 17. (1/2), 81-95.
AUSSENAC G. (1968) — Ann. Sci. For. 25 (3), 135-156.
AUSSENAC G. (1972) — Ann. Sci. For. 29 (3), 369-389.
BENECKE P. et MAYER R. (1971) — Integrated Experimental Ecology, Chapman et Hall, vol. 2, 153-163.
BOCHKOV A. (1958) — Nature et Ressources, vol. 6 (1), 11-13.
BODEUX A. (1954) — Agricultura, Vol. 2, série 2 (1), 1-80.
BRECHTEL H. (1969) — Deutsche Gewasserkundl. Mitt. Sonderheft, 24-31.
BULTOT F., DUPRIEZ G.L. et BODEUX A. (1972) — Journal of Hydrology 17, 193-223.
BURGER H. (1954) — Mitt. Schw. Aust. forstl. Versuchsw. 31 (1), 9-58.
COLVILLE J. et HOLMES J. (1972) — Journal of Hydrology 17 (1/2), 61-80.
DELFS J. (1967) — Int. Symp. For. Hydrol., Pergamon Press, 179-185.
DUVIGNEAUD et al. (1972) — Bull. Soc. Roy. Bot. Belg. 105 (1), 183-195.

EIDMANN F. (1959) — Ass. Int. Hydr. Scient. Public., n° 40, Gentbrugge.
ESCHNER A. (1967) — Int. Symp. For. Hydrol., Pergamon Press, 191-200.
FRASER D. et GAERTNER E. (1961) — Recent Advances in Botany, 1391-1396.
GRUNOW J. (1965) — Forstwiss. Centrabl. 84 (7-8), 212-229.
HELVEY J. (1971) — Purdue Univ., Lafayette, Indiana.
HEUVELDOP J. (1973) — Allg. Forst. u. J. Ztg. 144 (2), 35-41.
LADEFOGED K. (1960) — Physiol. Plant. 13, 648.
LADEFOGED K. (1963) — Physiol. plant. 16, (2), 378-414.
LAW F. (1956) — Ass. Int. Hydrol. Sci. Publ. 44, Gentbrugge.
LEVY G. (1969) — Ann. Sci. For. 26 (1), 65-79.
LEYTON L. et CARLISLE A. (1959) — Publ. Ass. Int. Hydrol. Sci. 48, 111-119.
MAC MINN R. (1960) — For. Biol. Div. Canada Dept. Agri., Publ. 1091, 71 p.
MARTIN ARANDA J. et COUTTS J. (1963) — J. of. Soil. Sci. 14 (1), 129-133.
MITSCHERLICH G. et MOLL W. (1970) — Allg. Forst. u. J.-Ztg. 141 (3), 49-60.
NOIRFALISE A. (1959) — Bull. Soc. Roy. For. de Belgique 66 (10), 433-439.
NOIRFALISE A. (1962) — La technique de l'eau, 16, 186, 17-26.
NOIRFALISE A. (1964) — Rapport Conseil de l'Europe EXP/NAT/WPI (64) 4, 36 p.
NOIRFALISE A. (1968) — Conseil de l'Europe, 28 p.
OVINGTON J. (1954) — Forestry, 27 : 41-53.
PISEK A. (1954) — Année biologique, 31, 41.
POLSTER H. (1950) — München, Bayerischer Landwirtschafts Verlag.
REYNOLDS E. et HENDERSON C. (1967) — Forestry, 40 (2), 165-184.
RUTTER A. (1959) — Ass. Int. Hydrol. Sci. Publ. 48, Gentbrugge.
RUTTER A. (1963) — J. Ecol. 51 (1), 191-203.
SCHUBERT A. (1939) — Thar. Forstl. Jahrb. 90, 821.
STAFELT M.G. (1944) — Kungl. Landbruksakad. 83, 4.
STANHILL G. (1970) — REICHLE, New York (pp. 242-256).
SWANK W. et MINER N. (1968) — Water Resour. Res. 4, 947.
SWANK W. et DOUGLASS J. (1974) — Science, 185 (4154), 857-859.
TRIMBLE G. et WEITZMAN S. (1954) — Trans. Amer. Geophys. Union, 35, 226-234.
VALEK (1959) — Ass. Int. Hydr. Sci. Public. 48, Gentbrugge.
WEIHE J. (1968) — Allg. Forstz. 23, (29), 522-525.
WHITE E. et CARLISLE A. (1968) — Quart. J. For. 62, 310-320.
WILM H. et DUNFORD E. (1948) — U.S. Dept. Agric. Techn. Bull. 968, 43 p.
WIND R. (1958) — Proc. Inf. Comm. Hyd. Res. (TNO) N° 3.
